



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**DIRECCIÓN GENERAL DE CARRETERAS**

**PROYECTO:**

**ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DEL RAMAL CAMELINAS**

**DEL LIBRAMIENTO SUR DE MORELIA**

**INFORME FINAL**

**Junio, 2012**

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

#### *Corte 1*

- La zona del Corte 1 está constituida por roca de calidad pobre (toba pumítica de baja compacidad y dureza) y la cercanía de esta zona al paso de dos estructuras regionales (Falla Altozano y Fractura Río Chiquito) ha provocado que el macizo rocoso en general presente alto grado de relajación, como muestran las bajas velocidades sísmicas registradas en todos los tendidos realizados.
- El estudio geotécnico realizado en 2009 no presenta análisis de estabilidad del corte, diseño geotécnico y no indica los tratamientos que se requerirán para su estabilidad y protección a largo plazo, solo se limita a presentar recomendaciones generales y se anota que el diseño definitivo se realizará durante la etapa de construcción.
- La altura máxima del corte, considerando la pendiente de diseño de 0.25:1 será de 50 m, sin embargo, esta pendiente se considera difícil de mantener, dadas las características de baja resistencia de estas rocas, por lo que la altura del corte seguramente se incrementará a más de 80 m, con tratamientos importantes para su estabilidad ante carga sísmica y presión hidrostática.
- Se considera que el proyecto del Corte 1 está inconcluso y deberá ser complementado, ya que como está proyectado en la actualidad presenta un alto riesgo potencial de inestabilidad y de erosión.

#### *Corte 2*

- La zona del Corte 2 está formada por brechas volcánicas con intercalaciones delgadas de derrames de andesita y también capas poco frecuentes de tobas arcillosas, los principales problemas que se prevén son el de caída y rodamiento de fragmentos y bloques de roca hacia el camino durante la época de lluvias y el de erosión superficial del talud debido al mismo fenómeno.
- Las características geológicas y sísmicas muestran que el macizo rocoso que constituirá el corte 2 presenta buena calidad y se encuentra relativamente poco relajado, con menos de un 25% de índice de relajación. Tampoco está afectado por estructuras geológicas regionales, por lo que no se prevé encontrar fracturamiento intenso en el macizo.
- El estudio geotécnico realizado en 2009 no presenta análisis de estabilidad del corte, diseño geotécnico y no indica los tratamientos que se requerirán para su estabilidad y protección a largo plazo, solo se limita a presentar recomendaciones

generales y se anota que el diseño definitivo se realizará durante la fase de construcción.

- La altura máxima del corte, considerando una pendiente de 0.25:1, será de 45 m y si se deja la berma recomendada en el proyecto, la altura se incrementaría un poco más.
- Las características geotécnicas del terreno donde se ubica el corte se consideran buenas, sin embargo, el proyecto está inconcluso y se considera que debe ser revisado tomando en cuenta toda la información existente del tramo.

### ***Viaducto Río Chiquito***

- La cimentación del Viaducto en las márgenes y cauce estará ubicada en la unidad TMbv-an, constituida por roca de buena calidad al nivel del desplante de los apoyos, con excepción del No. 3.
- Se considera que los niveles para desplante de la Pila 2 y Estribos 1 y 4 del puente, son adecuados. Sin embargo, se sugiere que para la Pila 3 se baje más el nivel de desplante para que quede ubicado en la zona de roca más competente.
- En el informe geotécnico del camino y viaducto no se presentan los valores de resistencia a la compresión uniaxial de los núcleos de roca de los diferentes sondeos realizados, los cuales debieron ser utilizados en las determinaciones de la capacidad de carga, por lo que existen dudas en la determinación de este importante parámetro de diseño, por lo que deberá revisarse este aspecto o aclarado debidamente, y en su caso revisado también el diseño estructural de los apoyos.
- Otro aspecto que debe ser revisado es el Estudio de Socavación del Viaducto, ya que en la redacción del mismo se hace referencia a otro puente que se ubica en el km 0+500.

### ***Túnel I***

- Las condiciones geológicas que se determinaron en este estudio para el Túnel I, difieren notablemente con las indicadas en el proyecto ejecutivo.
- El túnel I se excavará básicamente en tres tipos de rocas: en el tramo inicial, del km 1+371 al 1+650, se presentarán conglomerados de composición riolítica (TM cg) conformada por fragmentos de rocas riolíticas, empaçadas en una matriz areno-arcillosa y poco fracturadas; del km 1+371 al 1+650 se presentarán ignimbritas (TM ig) compactas, consistentes y fracturadas. En el tramo final, en el portal se salida, se presentarán materiales granulares poco consolidados del depósito de deslizamiento antiguo.

### **Túnel II**

- Con excepción del tramo final del túnel, se considera que el proyecto ejecutivo del túnel es adecuado, ya que los tratamientos determinados para las diferentes condiciones geotécnicas son en general conservadores. Podrán existir ligeras diferencias en la longitud de los tramos de cada condición geotécnica, sin embargo esto se considera normal siempre y cuando se lleve una supervisión geotécnica adecuada durante la construcción del túnel para que se apliquen los cambios de forma oportuna.
- Sin embargo, el tramo final del túnel es una zona problemática que tiene influencia importante con la inestabilidad potencial de la ladera La Paloma.

### **Portal de salida Túnel II**

- Realizar los estudios faltantes que se anotaron en el inciso de Conclusiones para la elaboración del proyecto ejecutivo del Túnel II.
  - Estudio geológico y geotécnico más detallado de esta zona de la ladera, abarcando toda el área de los deslizamientos Ocolusen.
  - Realización de perforaciones de investigación que ayuden a complementar lo anotado en el punto anterior y se aprovechen, algunas de ellas, para la instrumentación por medio de inclinómetros, específicamente para investigar la magnitud y profundidad de los desplazamientos que presenta el depósito de deslizamiento y para monitorear la estabilidad de la roca andesítica relajada, ubicada en la parte alta de la ladera.
  - Determinación de las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen las brechas volcánicas y el depósito del deslizamiento, tanto en la zona del portal del túnel y como en la parte superior de la ladera. Este trabajo debería ser realizado mediante pruebas in-situ y de laboratorio, y complementadas por retroanálisis de estabilidad que permitan tener valores más representativos.
  - En los puntos anteriores, debe incluirse de forma especial la zona del "troquel" que se ubica entre los deslizamientos Ocolusen 1 y 2.
  - Efectuar el estudio de riesgo sísmico específico de la zona para determinar el coeficiente de diseño que debe emplearse para los análisis de estabilidad que se efectúen.



- Como ejemplo de lo que puede suceder cuando se realizan obras en zonas con problemas potenciales de inestabilidad es la reactivación del deslizamiento antiguo localizado en el camino a Cumbres de Morelia. Si bien las obras del Túnel II y su portal son relativamente de menor volumen, la afectación de cualquier forma va a ocurrir.
- Para la SCT el problema relacionado con la zona urbana que se localiza inmediata al pie de la ladera se va incrementar en el sentido de que los daños que se observan actualmente en las viviendas, más los que se produzcan durante la construcción y operación de la obra a través del tiempo, van a ser atribuidos a las obras del túnel y de las excavaciones exteriores.
- Desde luego que existen soluciones en ingeniería para resolver en gran medida estos problemas, sin embargo por su magnitud se considera que serían de un alto costo. En el inciso siguiente de Recomendaciones se describen los estudios y las obras que se consideran necesarios.

## 6.2 Recomendaciones

### Corte 1

- Es necesario realizar un diseño geotécnico adecuado a las condiciones geológicas existentes en el corte, en el que se consideren, además de la pendiente correcta del corte, las obras necesarias para drenaje en la parte superior del corte, subdrenaje para alivio de presión hidrostática y la protección superficial de la roca para evitar que sea fácilmente erosionada por el agua de lluvia y se evite el desprendimiento de masas o bloques de roca hacia el camino.
- Es necesario realizar un estudio geológico de detalle en este corte, acompañado de sondeos exploratorios que permitan definir con mayor detalle la presencia de la zona de influencia de la fractura Rio Chiquito y las condiciones geotécnicas de la roca pumítica donde se excavara la mayor parte del corte.
- Se sugiere como una recomendación más amplia, para la seguridad del camino y reducir el impacto de la obra en el entorno, se modifique el trazo del camino; evitando pasar por esta zona, tratando de reducir la altura de los cortes en general y ubicando otro sitio para cruzar el río Chiquito mediante un puente de mayor longitud y altura, obviamente se debe mantener la pendiente adecuada del camino.

### **Corte 2**

- Es necesario realizar un diseño geotécnico adecuado a las condiciones geológicas existentes en el corte, en el que se debe considerar, además de la pendiente adecuada para la estabilidad, los tratamientos necesarios para su estabilidad local, protección contra caída de bloques y erosión superficial, con el objeto de que se ejecuten conforme descienda la excavación. También serán necesarias las obras de drenaje en la parte superior del corte y de subdrenaje para alivio de presión hidrostática del interior del macizo.
- La longitud y altura del corte va a producir un impacto ecológico fuerte en el entorno del área de la obra, por esta razón se sugiere modificar el trazo del camino, reubicando la entrada del Túnel II cerca del km 3+000, zona donde las condiciones geotécnicas para ubicar el portal del túnel son similares a las del sitio actualmente considerado, y así evitar la excavación de este Corte 2. Debido al acortamiento del camino en su longitud, debe revisarse también que la pendiente del camino sea la adecuada.

### **Viaducto Río Chiquito**

- Se recomienda revisar o aclarar lo relativo al cálculo de la capacidad de carga del terreno por las dudas en los parámetros de resistencia utilizados, y en su caso revisar los cálculos estructurales.
- Se recomienda revisar el estudio de socavación realizado, para ver si efectivamente corresponde a la zona de estudio.
- Conviene revisar la profundidad de desplante de la Pila 3 para que quede apoyada en roca de mejor calidad.

### **Túnel I**

- Con excepción de la zona de la entrada del túnel, con Condición Geotécnica "E", la zonificación del resto del túnel y los tratamientos deberán ser revisados poniendo especial atención a la nueva litología determinada en este estudio y a la zona de la falla geológica.
- Los tratamientos proyectados para la estabilidad temporal y a largo plazo del portal de entrada del túnel deben ser revisados, considerando la unidad litológica tipo conglomerado riolítico determinada en este estudio.
- Se debe revisar la pendiente de los cortes y los tratamientos proyectados para la estabilidad de la excavación del portal de salida, considerando que se trata de materiales granulares poco consolidados del depósito de deslizamiento antiguo.

- En la parte central del túnel se atravesará de forma esviada la falla Altozano o Túnel I, en una longitud aproximada de 80 m, la falla no fue detectada en los estudios realizados en el proyecto.
- Por esta razón, la descripción y ubicación de las distintas Condiciones Geotécnicas que se muestra en el diseño del túnel son incorrectas.
- En la información que fue entregada para revisión del proyecto no se encontró ninguna relacionada con la determinación de los parámetros empleados para la caracterización geotécnica del macizo rocoso de Calidad Q y Calidad RMR, así como de cada una de las Condiciones Geotécnicas que se presentan en el perfil del túnel.
- La pendiente de los cortes y los tratamientos proyectados para la estabilidad de la excavación del portal de salida se consideran inadecuados, dado que se trata de materiales granulares poco consolidados del depósito de deslizamiento antiguo.

### **Túnel II**

- La mayor parte del túnel se ubicará en la unidad litológica TMbv-an, constituida por intercalaciones de derrames de andesita, brechas volcánicas y tobas arcillosas en proporción variable; una longitud pequeña del túnel atravesará probablemente la unidad litológica TMpc en la parte central, formada por tobas pumíticas arenosas, mientras que la porción final del túnel y el portal del lado Morelia se ubicará en los depósitos granulares empacados en suelos finos, que constituyen el deslizamiento Ocolusen II.
- En la zona del portal de salida del túnel se encuentra muy cercano a la falla geológica regional "La Paloma" y a su franja de influencia tectónica.
- Con excepción del **tramo final del túnel** que se discute con más detalle en el siguiente inciso, se considera que el proyecto ejecutivo es adecuado, ya que los tratamientos determinados para las diferentes condiciones geotécnicas a lo largo de éste son en general conservadores. Podrán existir ligeras diferencias en la longitud de los tramos de cada condición geotécnica, sin embargo esto se considera normal siempre y cuando se lleve una supervisión geotécnica adecuada durante la construcción del túnel para que se apliquen los cambios de forma oportuna.

### **Portal de salida del Túnel II**

- Como conclusión de los trabajos de investigación y análisis desarrollados en la zona del portal de salida, que ponen en evidencia la inestabilidad natural de toda la ladera y donde actualmente ya existen los deslizamientos antiguos de Ocolusen.
- Es probable que a primera vista el problema no sea tan evidente, sin embargo los antecedentes del área, los aspectos geológicos encontrados y los análisis de sensibilidad realizados durante el desarrollo de este estudio, muestran que existe un potencial de riesgo alto geológico en la zona de los deslizamientos de Ocolusen.
- El cantil "La Paloma" es una zona geológica peculiar desde el punto de vista geológico y geotécnico por las siguientes razones:
  - El cantil se encuentra muy cerca de la falla geológica "La Paloma", que es el rasgo estructural de mayor relevancia de la región, se ha considerado como una falla activa, con potencial de generación de sismos y con deslizamientos asociados a ella. La falla tiene una orientación promedio N 78°E y corresponde a una falla normal con bloque caído hacia el al NW con un echado de 76°.
  - o Las rocas volcánicas (brechas con intercalaciones de derrames de andesita y tobas) que se encuentran cerca de la zona de la falla regional "La Paloma" presentan los efectos del tectonismo provocado por esta falla, por lo que tienen un fracturamiento subvertical inducido y abierto, el cual ha facilitado la alteración a profundidad de la roca y su relajación.
  - o Las rocas volcánicas presentan pseudoestratos con ligera inclinación hacia el exterior y algunos de éstos forman capas débiles de baja resistencia (tobas alteradas) que propician el desplazamiento del terreno.
  - o A lo largo de la traza de la falla "La Paloma" existen varios deslizamientos antiguos de la ladera, originados por diversos fenómenos geológicos, como son los tectónicos, intemperismo y erosión.
  - o Los estudios geológico-geofísicos realizados en este estudio demostraron que las rocas andesíticas que se encuentran en la zona de la ladera, se encuentran muy relajadas y fracturadas en un espesor entre 10 y 20 m, y afectadas por el fracturamiento inducido hasta los 40 m.
  - o Los materiales que constituyen esta zona son bastante sensibles a los cambios de resistencia por el intemperismo y a las modificaciones de la pendiente natural del terreno que pueden provocar las obras.
  - o La sismicidad influye de forma importante en la inestabilidad, ya sea de tipo local asociada a potenciales movimiento de la falla La Paloma, o de tipo

regional provenientes de los procesos de subducción en la zona del Pacífico.

- La presencia de condiciones extremas de saturación en las fracturas también influye de manera significativa en la inestabilidad, ya que la presión del agua en las fracturas existentes produce empuje hidrostático en el terreno que disminuye el factor de seguridad.
- El análisis de sensibilidad realizado de la ladera en su conjunto, roca relajada – depósito de talud existente, muestra que las condiciones potenciales de inestabilidad natural son altas, ya sea por la presencia de un sismo o de una condición extrema de saturación del terreno.
- Estas condiciones de inestabilidad podrán ser aceleradas por las obras proyectadas del túnel y excavaciones a cielo abierto en la zona del portal. Estas condiciones potenciales de inestabilidad no fueron tomadas en cuenta en el diseño ejecutivo del túnel ni del portal de salida, debido a:
  - Falta de conocimiento geológico y geotécnico más detallado de esta zona.
  - Ausencia de perforaciones de investigación que ayudaran a complementar lo anotado en el punto anterior.
  - Falta de determinaciones in-situ de las propiedades mecánicas de los materiales que constituyen las brechas volcánicas y el depósito del deslizamiento.
  - No se proyectó ni ejecutó durante el estudio un programa de instrumentación de la ladera en general, incluyendo la zona del “troquel” y del depósito de deslizamiento que permitiera monitorear movimientos actuales.
  - Tampoco se desarrolló un estudio de riesgo sísmico específico de la zona para determinar el coeficiente de diseño.
- Es difícil establecer cuando podría producirse nuevamente un deslizamiento en la zona Ocolusen, ya sea en la zona donde se proyecta el portal del Túnel II o donde se localiza el “troquel” de roca ubicado inmediatamente al poniente, sin embargo las condiciones naturales encontradas en el desarrollo de este estudio indican que en la zona de roca relajada de la parte superior de la ladera y el propio depósito de deslizamiento antiguo conllevan un alto riesgo.

- Dependiendo de los resultados determinados en el inciso anterior, se podrán proyectar las siguientes obras de protección y/o estabilización:
  - Obras para la estabilización del depósito de deslizamiento ubicado al pié de la ladera en la zona del portal de salida, con el objeto de evitar el asentamiento y/o desplazamiento del Túnel II excavado y falso, así como las instalaciones exteriores ahí proyectadas. Dependiendo de la profundidad de la superficie de corrimiento que se determine en los estudios previos será el tipo y magnitud de la obra que se requiera para su estabilización. Probablemente el revestimiento del túnel deba construirse con concreto reforzado y no simple, como está diseñado actualmente.
  - Obras para asegurar la estabilidad de la ladera donde se presenta la roca andesítica (Tm bv-an) alterada y relajada, abarcando un área frontal de al menos de 100 m a cada lado del eje del túnel; los trabajos que se estiman necesarios serían:
    - Perforaciones laterales y ascendentes para subdrenaje, preferentemente desde el interior del Túnel II para poder drenar la capa más profunda de este material en forma eficiente, complementado con drenaje sistemático ejecutado desde el exterior.
    - Diseño de un sistema de anclaje superficial de la ladera, cuya densidad y profundidad dependerá de los resultados del estudio geológico de detalle y de los análisis de estabilidad, considerando que el efecto sísmico es el más importante si ya la masa rocosa está drenada.
    - Los límites laterales del tratamiento deben establecerse con base en los análisis e hipótesis que se establezcan, por lo que el área frontal que se menciona al principio del inciso es solo indicadora.
  - Con base en el análisis que permita determinar el grado de influencia que tendrán las obras del Túnel II en la estabilidad del "troquel", se podrían requerir adicionalmente los siguientes trabajos en esa zona:
    - Perforaciones para subdrenaje del macizo rocoso del "troquel".
    - Reforzamiento de la roca andesítica (TM bv-an) relajada en la zona donde el Túnel II la atravesará, y que corresponde a la parte interna del pié de la ladera en ese material. Este reforzamiento podría ser realizado utilizando el mismo túnel como anclaje, mediante la construcción del revestimiento con concreto reforzado y con ampliaciones laterales de la sección del túnel que se rellenarían de concreto para incrementar la fricción.

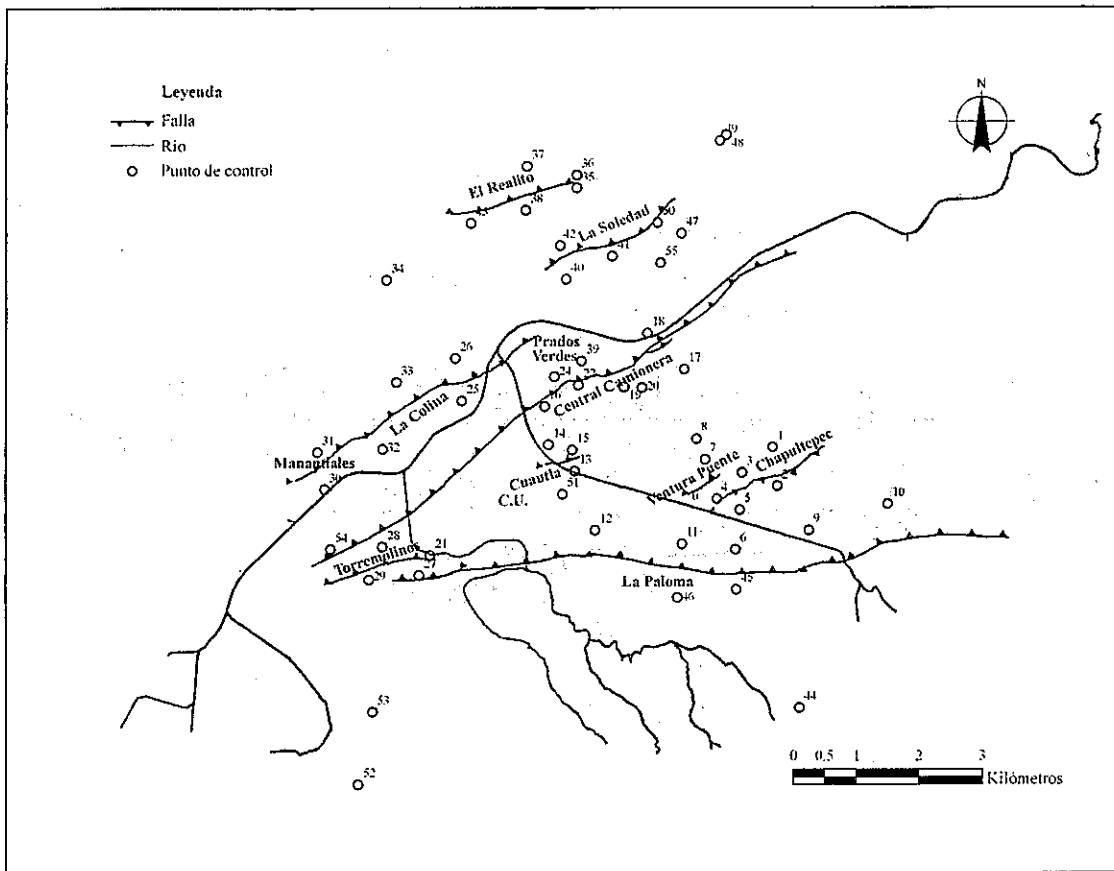


Figura 3.1.4 Plano de Morelia con las principales fallas geológicas: La Paloma y La Colina, y las relacionadas con fenómenos de fluencia: Central Camionera, Chapultepec y Torremolinos (Tomado del Instituto sobre Investigaciones sobre Recursos Naturales, UMSNH, [www.inirena.umich.mx/images](http://www.inirena.umich.mx/images))

En estudios recientes se han identificado y clasificado a estas fallas por su origen en: fallas geológicas potencialmente activas y fallas ligadas a hundimientos (Garduño et. al. 2001).

Las fallas geológicas asociadas con el SFMA presentan una dirección preferencial E – W y corresponde a las fallas La Colina y La Paloma, las cuales se han asociado con actividad sísmica potencial y están ligadas a inestabilidad de taludes

La falla La Colina tiene una orientación NE-SW y es una falla normal, presenta un hundimiento con una tasa de movimiento vertical de 4 a 6 cm anuales (*creep*). Su zona de influencia es variable, siendo en la zona de Tres Puentes-La Colina de 20 metros a ambos lados de la falla, de 15 m en Las Águilas, López Mateos y Agua Clara y de 20 m en la zona de Manantiales (Garduño et. al. 2001).



## INDICE

### 1 INTRODUCCION

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Localización de la zona de estudio
- 1.4 Características del proyecto geométrico
- 1.5 Método de trabajo
  - 1.5.1 Recopilación y análisis de la información
  - 1.5.2 Análisis fotogeológico
  - 1.5.3 Levantamiento geológico de campo
  - 1.5.4 Estudios geofísicos
  - 1.5.5 Procesamiento e interpretación de la información
  - 1.5.6 Elaboración de informe geológico y geotécnico

### 2 INFORMACION RECOPIlada

- 2.1 Información geológica regional
- 2.2 Información geológica - geotécnica local
- 2.3 Información del proyecto Ramal Camelinas

### 3 GEOLOGIA

- 3.1 Marco geológico regional
- 3.2 Geología de la zona del proyecto
  - 3.2.1 Estratigrafía
  - 3.2.2 Fallas y fracturas
  - 3.2.3 Deslizamientos





#### 4 GEOFISICA

##### 4.1 Estudio Sísmico

4.1.1 Trabajos de campo

4.1.2 Procesamiento sísmico

4.1.3 Resultados

4.1.3.1 Corte 1

4.1.3.2 Corte 2

4.1.3.3 Viaducto rio Chiquito

4.1.3.4 Túnel II y deslizamiento Ocolusen

##### 4.2 Estudio Eléctrico

4.2.1 Trabajos de campo

4.2.2 Procesamiento eléctrico

4.2.3 Resultados Túnel II y deslizamiento Ocolusen

#### 5 INGENIERIA GEOLOGICA Y GEOTECNIA DE LAS OBRAS

##### 5.1 Corte 1

5.1.1 Condiciones geológicas

5.1.2 Condiciones geotécnicas

##### 5.2 Corte 2

5.2.1 Condiciones geológicas

5.2.2 Condiciones geotécnicas

##### 5.3 Viaducto

5.3.1 Condiciones geológicas

5.3.2 Condiciones geotécnicas

##### 5.4 Túnel I

5.4.1 Condiciones geológicas

5.4.2 Condiciones geotécnicas



## 5.5 Túnel II

5.5.1 Condiciones geológicas

5.5.2 Condiciones geotécnicas

## 5.6 Zona del portal de salida Túnel II y deslizamiento Ocolusen II

5.6.1 Características geotécnicas de las rocas andesíticas (TMbv-an) en el escarpe y los materiales del deslizamiento Ocolusen (Qd)

5.6.1.1 De la exploración geológica

5.6.1.2 De los retroanálisis de estabilidad

5.6.1.3 De las observaciones de campo

5.6.2 Análisis de sensibilidad del cantil "La Paloma", zona de Ocolusen

5.6.3 Condiciones de estabilidad de la zona del "troquel de roca DI-DII"

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones



## PLANOS

- Plano 1.1 Ramal Camelinas - Obras viales del proyecto
- Plano 2.1 Ramal Camelinas - Estudios previos de exploración geológica
- Plano 3.1 Ramal Camelinas - Mapa geológico
- Plano 3.2 Ramal Camelinas - Secciones geológicas generales
- Plano 3.3 Portal de salida del Túnel II - Mapa geológico
- Plano 4.1 Ramal Camelinas - Localización de la exploración geofísica
- Plano 4.2 Corte 1 y Viaducto - Secciones geosísmicas
- Plano 4.3 Corte 2 - Secciones geosísmicas
- Plano 4.4 Portal de salida del Túnel II - Secciones geosísmicas
- Plano 4.5 Túnel II - Sección geoeléctrica
- Plano 4.6 Portal de salida del Túnel II - Secciones geoeléctricas
- Plano 5.1 Túnel I - Mapa y sección geológica
- Plano 5.2 Túnel I - Sección geotécnica
- Plano 5.3 Túnel II - Mapa y sección geológica
- Plano 5.4 Túnel II - Sección geotécnica
- Plano 5.5 Portal de salida del Túnel II - Mapa y secciones geotécnicas



## **ANEXOS**

- Anexo 3.1 Memoria fotográfica del estudio geológico
- Anexo 3.2 Puntos de verificación geológica
- Anexo 3.3 Parámetros utilizados en la descripción de los macizos rocosos
  
- Anexo 4.1 Memoria fotográfica del estudio sísmico
- Anexo 4.2 Procesamiento sísmico (Dromocrónicas)
- Anexo 4.3 Procesamiento eléctrico (Curvas de resistividad)

## 1. INTRODUCCION

### 1.1 ANTECEDENTES

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes tiene contemplada la construcción del Ramal Camelinas del Libramiento Sur Morelia, obra que permitirá agilizar el tránsito urbano en la zona de la ciudad.

El proyecto del Ramal Camelinas tiene una longitud de 4.4 km, con un ancho de corona de 12 m para alojar dos carriles de circulación de 3.5 m cada uno, además considera dos túneles carreteros de 448.01 y 731.68 m de longitud y un viaducto de 151.67 m de longitud.

El proyecto se encuentra en la zona sureste de la ciudad, a una distancia de 3.5 km de la Avenida Camelinas con dirección al Club Campestre de Morelia y a lo largo de las laderas del Rio Chiquito hasta subir a la Loma de Santa María.

La Secretaria de Comunicaciones y Transportes (SCT), a través de la Dirección General de Carreteras Federales, realizo diversos estudios geológicos y geotécnicos en la zona del proyecto, que permitieron elaborar los proyectos ejecutivos de estas obras viales.

Sin embargo, la SCT ha decidido realizar un estudio complementario que analice con mayor detalle las condiciones geológicas y geotécnicas en la zona de influencia de las diversas obras de la carretera, identificando y valorando la existencia de riesgos geológicos potenciales que puedan afectar a los asentamientos urbanos y a las obras viales.

### 1.2 OBJETIVOS

#### a) Objetivo general

Realizar un estudio geológico que permita identificar y valorar riesgos geológicos potenciales para el proyecto Ramal Camelinas del Libramiento Sur de Morelia.

#### b) Objetivos particulares

- Revisar y complementar el modelo geológico conceptual de la zona del proyecto, considerando a las unidades estratigráficas y estructuras geológicas.
- Caracterizar de forma detallada los sistemas de fracturas que afectan a las rocas.
- Realizar estudios geofísicos que auxilien en la determinación de las características y distribución de los materiales en el subsuelo.

- Definir la presencia, zona de influencia y características de las fallas geológicas que pueden encontrarse en la zona del proyecto, en especial las fallas "La Paloma" y "Rio Chiquito", así como la posible incidencia que tendrán en la construcción y operación de las obras viales.
- Validar los modelos geológico-geotécnicos utilizados para elaborar los proyectos ejecutivos de las obras.
- Revisar si los procedimientos constructivos y tratamientos considerados en las diversas obras del proyecto, tomaron en cuenta adecuadamente las condiciones geológico-geotécnicas existentes en la zona.

### 1.3 LOCALIZACION DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona donde se ubica el Ramal Camelinas se ubica en la parte sureste de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán; el cual forma parte de las obras proyectadas del Libramiento Sur de Morelia, que tiene como objetivo comunicar a la zona sureste de la ciudad con la Loma de Santa María y de ahí a la carretera a Pátzcuaro, como se muestra en la figura 1.1.



Figura 1.1 Ubicación del proyecto del Libramiento Sur de Morelia

El Ramal Camelinas inicia en la parte alta de la Loma de Santa María cerca del Centro Comercial, de ahí el camino comienza a descender paulatinamente hacia el Río Chiquito en dirección oriente, para después girar hacia el poniente y norte para llegar a la zona sureste de la ciudad cerca de la Av. Camelinas, tal como se muestra en la figura 1.2.



Figura 1.2 Ubicación del Ramal Camelinas

#### 1.4 CARACTERISTICAS DEL PROYECTO GEOMETRICO

El proyecto geométrico elaborado por la Dirección General de Carreteras de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes contempla la construcción de terraplenes, cortes, dos túneles y un viaducto, tal como se ilustra en la figura 1.3 y en el plano 1.

Los tramos en los que se ubican las diferentes obras civiles del proyecto geométrico son:

- Del km 0+200 al 1+380, el camino va descendiendo con terraplenes y sin cortes importantes.
- Del km 1+371 al 1+1+820, se construirá el Túnel 1, de 449 m de longitud.
- Del km 1+820 a 2+080, el camino va en terraplén sobre una zona plana.
- Del Km 2+080 al 2+380 se atraviesa la ladera de un cerro con fuerte pendiente en el lado poniente y por lo que se realizaran cortes altos en un tramo de 300 m.

- Del 2+370 al 2+521, se construirá un viaducto para cruzar el Rio Chiquito de 151 m de longitud.
- Del 2+521 al 2+930, el trazo va sobre una zona plana sobre la margen derecha del rio Chiquito y cruzara un arroyo, por lo que se colocaran terraplenes importantes
- Del 2+930 al 3+471, el camino va por la ladera de un cerro con fuertes pendientes por la margen derecha del rio Chiquito, lo que implicara realizar cortes altos en un tramo de 541 m de longitud
- Del 3+471 al 4+202, se construirá el Túnel II, de 731 m de longitud.

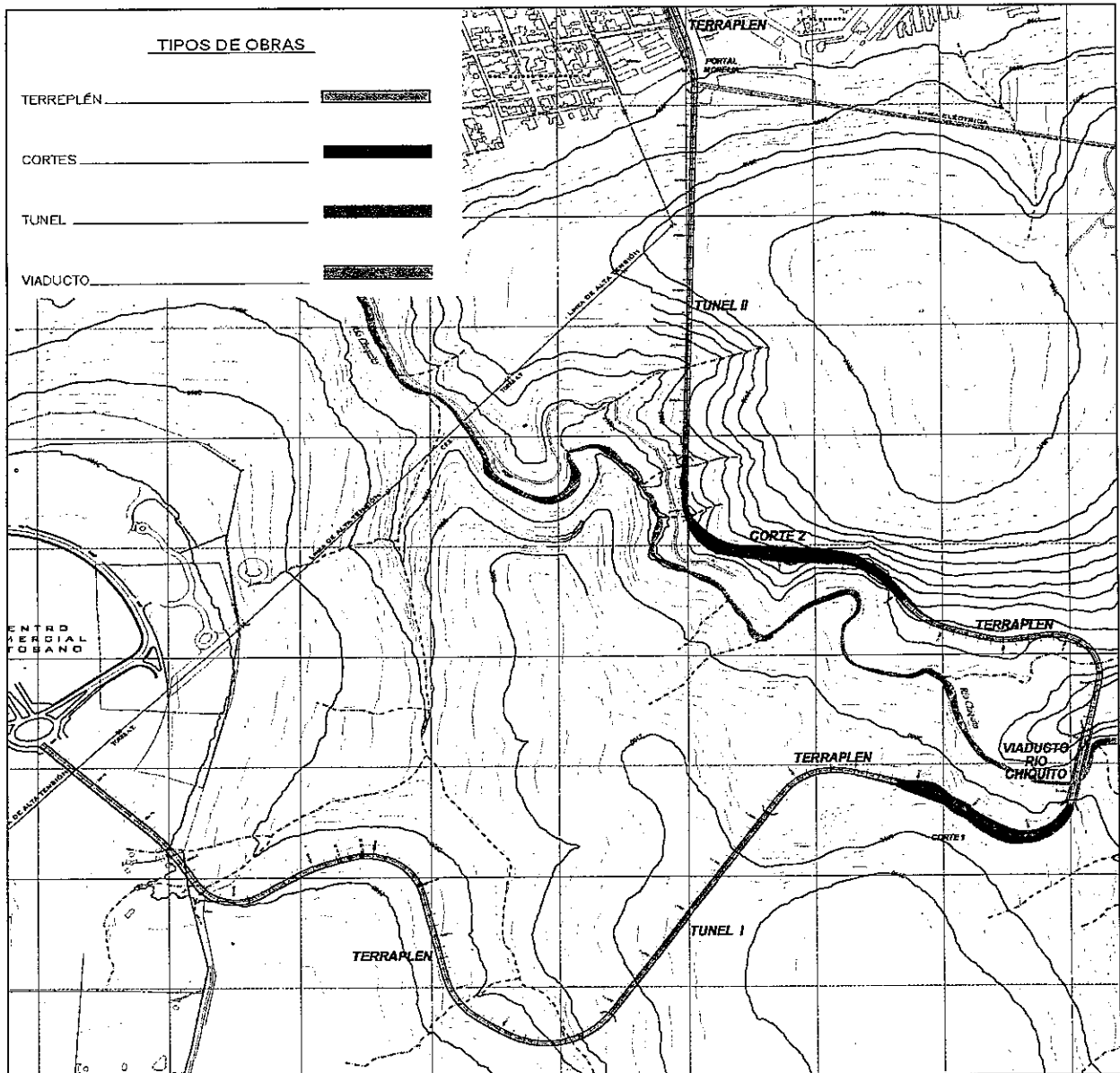


Figura 1.3 Obras que componen el proyecto del Ramal Camelinás



## 1.5 METODO DE TRABAJO

En este apartado se presenta una breve descripción de los diferentes trabajos realizados en este estudio.

### 1.5.1 Recopilación y análisis de la información

Como primera fase se llevo a cabo una recopilación de toda la información de interés para este estudio, como son fotografías aéreas, imágenes satelitales, cartas topográficas, mapas geológicos elaborados por el INEGI, Instituto de Geología de la UNAM, Servicio Geológico Mexicano, Universidad Michoacana de San Nicolás y otros disponibles.

Así mismo, se procedió a recopilar información de estudios realizados en la ciudad de Morelia, de tipo geológico, geotécnico, geohidrológico, geofísico y sismológico, efectuados por empresas, profesionales e investigadores de instituciones académicas michoacanas, nacionales y extranjeras.

Se revisaron los diversos estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos que llevaron a cabo para elaborar el proyecto ejecutivo del camino, por parte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Esta información fue debidamente organizada y analizada por tópicos, presentando un listado de toda la información documental procesada y un resumen que de la información que se considere útil para los alcances de este estudio; esta información se presenta en el capítulo 2 de este informe.

### 1.5.2 Análisis fotogeológico

Con el apoyo de las fotografías aéreas e imágenes satelitales, se llevo a cabo el análisis fotogeológico que abarco la zona donde se ubican las obras viales y a lo largo de la traza de las fallas geológicas identificadas.

La SCT proporciono pares estereoscópicos de fotografías aéreas verticales a escala 1:20,000, en blanco y negro, tomadas en marzo de 1993; así como mosaico fotográfico a color reciente, que cubre toda la zona del proyecto del camino.

Se utilizaron las imágenes satelitales del Google y el Espaciomapa del INEGI a escala 1:250,000 de la Hoja Morelia.

El análisis fotogeológico permitió auxiliar en la identificación de las unidades litológicas y su distribución en la zona de estudio, así como en el análisis estructural, definiendo la traza y continuidad de fallas y fracturas regionales.

Se llevo a cabo un análisis fotogeológico detallado de las zonas donde se presentan deslizamientos antiguos de ladera, donde se delimitaron las trazas de los límites de cada

deslizamiento y las zonas de acumulación, así como los tipos de materiales involucrados en cada deslizamiento.

Como resultado de esta actividad se elaboró un mapa fotogeológico preliminar, donde se incorporo toda la información analizada: morfológica, geológica y geotécnica, y que sirvió de base para el levantamiento geológico de campo.

Por último, esta información fue utilizada para conformar los mapas y secciones geológicas del Ramal Camelinas (Plano 3.1, 3.2 y 3.3).

### 1.5.3 Levantamiento geológico de campo

Se llevo a cabo el levantamiento geológico de campo que abarco toda el área del proyecto del Ramal Camelinas, las fallas geológicas principales, las zonas de deslizamientos existentes y las consideradas como potencialmente inestables, así como otros sitios de interés que en el análisis fotogeológico identifico.

Se identificaron las unidades litológicas que afloran en la zona de estudio y se verifico su distribución superficial, poniendo los contactos en los planos topográficos disponibles; se describieron sus principales características geológicas, como son el tipo de roca, textura, estructura, alteración, consistencia, dureza y fracturamiento.

Durante los recorridos de campo se fueron tomando muestras de roca de cada unidad litológica, y algunas de ellas fueran enviadas a laboratorio para realizarles análisis petrográficos.

Se realizo un levantamiento estructural de las discontinuidades que permitieron definir las familias de discontinuidades de cada unidad litológica y sus principales características ingenieriles, como son orientación e inclinación, espaciamiento, continuidad, rugosidad, apertura, relleno, etc.

Se analizaron las estructuras geológicas regionales con el mayor detalle posible, ubicando sus trazas en los planos topográficos, tomando datos de dirección e inclinación, continuidad, rugosidad, apertura, espesor y rellenos, así como las condiciones de las rocas encajonantes.

Se revisaron las condiciones geológicas de las laderas donde se tiene proyectado ubicar los portales de entrada y salida de cada túnel, determinando la distribución y características de los materiales, la presencia de fallas geológicas y evidencias que indicaron la presencia de zonas con problemas de inestabilidad potenciales.

Se tomaron fotografías que permitieron estudiar, analizar y discutir en gabinete las condiciones geológicas de las zonas de estudio así como la elaboración del informe fotográfico respectivo (Anexo 3.1).

#### 1.5.4 Estudios geofísicos

Se realizó una investigación del subsuelo con métodos geofísicos indirectos que permitieron auxiliar en la determinación de las características físicas y distribución en el subsuelo de los materiales, principalmente en las zonas de portales de los túneles.

El estudio se realizó aplicando dos métodos geofísicos complementarios: el sísmico de refracción y el eléctrico de resistividad.

##### *a) Estudio Sísmico*

El estudio sísmico de refracción tuvo como objetivo el determinar las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y con base en ellas efectuar una caracterización de los materiales del subsuelo para determinar de forma indirecta el grado de alteración, consistencia y fracturamiento de las rocas, así como los contactos entre los suelos/depósitos de talud y la roca, y el contacto entre roca alterada/fracturada y rocas sana.

Los trabajos de campo consistieron en realizar Tendidos Sísmicos de una longitud entre 60 y 120 m, con geófonos espaciados 5 a 10 m y tres a cinco puntos de tiro de acuerdo al arreglo empleado; la fuente de energía serán golpes de marro cobre una placa metálica. Por lo tanto la profundidad de investigación oscilara entre 25 y 50 m. Se emplearon Sismógrafos digitales y geófonos de onda P.

La información obtenida fue procesada por medio de programas de cómputo especializados, para determinar en cada tendido los estratos sísmicos y sus velocidades; posteriormente se integraron en líneas geosísmicas, interpretadas en base a los valores de velocidad y tomando en cuenta el modelo geológico de cada línea.

La distribución de los sondeos eléctricos se realizó en base al modelo geológico obtenido después de realizar los levantamientos geológicos de campo, por lo que los tendidos sísmicos se realizaron principalmente en la zona del portal de salida de los túneles I y II, así como en los sitios donde se efectuaran los cortes 1 y 2, y en el viaducto del Río Chiquito. Se realizaron un total de 29 tendidos sísmicos.

##### *b) Estudio Eléctrico*

El estudio sísmico de refracción tuvo como objetivo el determinar la resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo, y con base en ella auxiliar en la determinación de las condiciones de los materiales en cuanto al grado de fracturamiento y alteración de las rocas, así como los contactos entre los depósitos de talud y la roca.

Los trabajos de campo consistieron en realizar tendidos electromagnéticos que permitieron determinar los valores de resistividad en el subsuelo hasta una profundidad de 200 m.

La información obtenida fue procesada por medio de programas de cómputo especializados, para determinar en cada tendido los estratos eléctricos y sus resistividades; posteriormente se integraron en líneas geoelectricas interpretadas en base a los valores de resistividad y tomando en cuenta el modelo geológico de cada línea.

La distribución de los sondeos eléctricos se realizó en base al modelo geológico obtenido después de realizar los levantamientos geológicos de campo, y se ubicaron principalmente en la zona del portal de salida del Túnel II y a lo largo de la alternativa del Túnel II. En total se realizaron 50 tendidos electromagnéticos.

### **1.5.5 Procesamiento e interpretación de la información**

La información obtenida de la recopilación documental, el análisis fotogeológico y los levantamientos de campo, fue procesada para elaborar el modelo geológico-geotécnico de la zona de estudio.

La información de las discontinuidades se proceso por medio de diagramas estereográficos que ayudaron a definir los sistemas de fracturas y realizar análisis cinemáticos de estabilidad que auxiliaron a determinar mecanismos de falla potenciales en el macizo rocoso (Anexo 2).

Se elaboró un mapa geológico que muestra la distribución superficial de las unidades litológicas, las fallas geológicas detectadas y las zonas deslizadas en toda la zona que comprende el Ramal Camelinas.

Se efectuaron secciones geofísicas sísmicas y eléctricas, interpretadas con base en el modelo geológico.

Se revisaron las consideraciones geológicas con las que se realizó el diseño geotécnico de los túneles.

Se revisaron las clasificaciones geomecánicas y los perfiles geotécnicos integrados que se elaboraron a lo largo del eje de los túneles, así como los análisis de estabilidad de los taludes y tajos de acceso a los mismos.

Se revisaron los procedimientos de excavación y soporte propuestos en el diseño ejecutivo de las excavaciones a cielo abierto y subterráneo.

### **1.5.6 Elaboración de informe geológico y geotécnico**

Se redactó el informe geológico que describe las actividades realizadas y los resultados obtenidos en cada una de las actividades realizadas.

Se describen las características de las unidades litológicas y de las discontinuidades presentes en cada una de ellas. Las condiciones que muestran de las fallas y fracturas de

tipo regional presentes en el área, detallando las características, condiciones estructurales, grado o tipo de actividad y asociación con la actividad sísmica del área.

Se analizaron los resultados de los estudios geofísicos realizados, describiendo la metodología de campo y procesamiento y los resultados obtenidos; anexando la memoria con fotografías de los trabajos de campo.

Se describen las condiciones geológicas y geotécnicas que guardan las laderas en los portales de entrada y salida de las excavaciones subterráneas, así como del macizo rocoso atravesado por éstas, respecto a su estabilidad y comportamiento esperado a largo plazo.

Se presentan las recomendaciones geotécnicas derivadas de la revisión del proyecto ejecutivo, así como las conclusiones geológicas y geotécnicas relacionadas con la viabilidad del proyecto, los riesgos potenciales y sus implicaciones con las áreas urbanas circundantes.

Se presenta el informe impreso con sus planos y anexos correspondientes, y toda la información debidamente digitalizada y ordenada en CD.

## 2. INFORMACION RECOPIADA

Como resultado de la recopilación de la información, se lograron obtener diversos trabajos relacionados con aspectos geológicos regionales, así como estudios geológicos y geotécnicos en relación con la problemática de las fallas existentes en la ciudad de Morelia, y por último, los estudios y proyectos que han realizado tanto el gobierno del estado de Michoacán como la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

Los resultados del análisis de esta información se utilizaron para realizar los diversos apartados de este informe. Se presenta una relación de los principales trabajos que fueron recopilados y analizados como parte de este estudio.

### 2.1 INFORMACIÓN GEOLÓGICA REGIONAL

La información geológica obtenida fue muy útil para poder comprender el modelo geológico regional en el que se encuentra la zona de estudio; a continuación se enlistan los trabajos más importantes.

1. Gómez-Tuena, Arturo; Orozco-Esquivel, Ma. Teresa; Ferrari, Luca., Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. LVII, núm. 3, 2005, pp. 227-283 Sociedad Geológica Mexicana.
2. Odranoel Quintero-Legorreta, 2002, Análisis estructural de fallas potencialmente activas, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LV, No 1, 2002, p.1-11.
3. Garduño Monroy V. H., Cuevas Muñiz A., Escamilla Torres R. J., 1998, Descripción histórica de la sismicidad en Colima, Jalisco y Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
4. Marie-Noëlle Guilbaud, Claus Siebe, Paul Layer, Sergio Salinas, Renato Castro-Govea, Victor Hugo Garduño-Monroy, Nicolas Le Corvec, 2011, Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jorullo Volcanoregion, Michoacán, México. Journal of Volcano and Geothermal Research 201, 97-112.
5. Pasquare G., Ferrari L., Garduño Monroy V. H., Tibaldi A., 1990, Migrazione di un arco vulcanico continentale: dalla Sierra Madre Occidentale all'arcovulcanico messicano. Mem. Soc. Geol. It. 45, p. 939-946.
6. Pasquare G., Ferrari L., Garduño Monroy V. H., Tibaldi A., Vezzoli L., 1991, Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán, Mexico, Geological Society of America, Map and Chart Series MCH072.

7. Garduño Monroy V. H, et al. 2009, Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 26, núm. 3, p. 623-637.
8. Garduño Monroy V. H, et al. 2009, Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. Geofísica Internacional, 48 (3), 319-335
9. Ego Frédéric, Ansan Véronique., 2002, Why is Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99°W) in transtensive deformation? Tectonophysics, 359, 189-208.
10. Mapas geológicos
  - Servicio Geológico Mexicano, 2010, "Carta Geológica Minera Morelia E14-1", escala 1:250,000
  - Instituto Nacional de Geografía y Estadística, 2000, "Carta Geológica Morelia E14-1", escala 1:250,000
  - Instituto de Geología de la UNAM, 1995, "Carta Geológica Morelia 14Q-g(2)", escala 1:100,000

## 2.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA - GEOTÉCNICA LOCAL

En virtud de la problemática que se ha venido presentado en la ciudad de Morelia en los últimos 20 años, relacionada con los fenómenos de subsidencia y presencia de fallas geológicas activas, se han realizado una gran cantidad de estudios geológicos, geotécnicos y geohidrológicos, a través instituciones académicas y sociedades técnicas.

La mayor parte de estos estudios han sido realizados por académicos de la Universidad Michoacana de San Nicolás, a través de trabajos de investigación y elaboración de tesis profesionales, incluso algunos de ellos han sido publicados en diversas revistas o boletines geológicos locales, nacionales e internacionales.

A continuación se enlistan los principales trabajos que se consultaron, en orden alfabético:

1. Arreygue-Rocha E., Garduño Monroy V. H., Canuti Paolo., Casaglie Nicola., Lotti Alberto., Chiesa Sergio. 2001, Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 19, núm. 2, p. 91-106.
2. Arreygue-Rocha E., Canuti P., Casagli N., Lotti A., Garduño Monroy V. H., Las condiciones de riesgo hidrogeológico en la ciudad de Morelia, (Michoacán, México) patrimonio mundial de la humanidad. ICOMOS XII Asamblea General.

3. Avila Oliveira J. A., Garduño Monroy V. H., 2007. Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia. *Ciencia Nicolaita*, No. 46.
4. Ávila Olivera Jorge Alejandro, 2004. Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con procesos de subsidencia-creep-falla, caso la ciudad de Morelia, Michoacán, México. Universidad Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Tesis de Maestría.
5. Avila Oliveira J. A., Garduño Monroy V. H., 2008, A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico., *Engineering Geology*, 100,
6. Cigna Francesca, Batuhan Osmanoglu, Cabral Cano E., Dixon Timothy H., Avila Oliveira J. A., Garduño Monroy V. H., DeMets Charles., Wdowinski Shimon, 2012, Monitoring land subsidence and its induce geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, México. *Remote Sensing of Environment* 117, 146-161.
7. Domínguez Ortiz Fidel. 2003, Los procesos de remoción en masa y sus relaciones con la sismicidad potencial en el sector de Ocolusen de la Falla La Paloma, Morelia, Mich., México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis Profesional.
8. Garduño Monroy V. H., Arreygue-Rocha E., Israde Alcántara I., Rodríguez Torres G., 2001, Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 1, p. 37-54.
9. Garduño Monroy V. H., Arreygue-Rocha E., Chiesa S., Israde Alcántara I., Rodríguez Torres G., Ayala G. M., 1998. Las fallas geológicas y sísmicas de la ciudad de Morelia y su influencia en la planificación de su territorio. *Ingeniería Civil*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Vol. I, no. 5.
10. Ibáñez Garduño D., Álvarez Béjar R., Garduño Monroy V. H., Israde Alcántara L., Arreygue Rocha E., 2002<sup>a</sup>. Determinación de zonas de falla-creep en áreas urbanas de antiguas zonas lacustres mediante Georadar. *Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia*, 1, 253-267.
11. Pola Villaseñor A., Garduño Monroy V. H., Díaz Salgado C., Hernández Madrigal V. C., 2006, Estudio geotécnico asociado a los procesos de remoción de masa del parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia (Michoacán, México). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana, Tomo LVIII, Núm. 2, p. 183-193.



12. Pola Villaseñor Antonio, 2003. Estudio geotécnico, geofísico y análisis de los problemas de remoción de masa y obras de mitigación del Parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia, México. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis Profesional.

### 2.3 INFORMACIÓN DEL PROYECTO RAMAL CAMELINAS

El gobierno del estado de Michoacán y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) han venido realizando diversos estudios geológicos y geotécnicos para la elaboración del proyecto carretero del Ramal Camelinas del Libramiento Sur de Morelia.

La información proporcionada por la Dirección General de Carreteras de la SCT:

#### 1. Estudio geotécnico del camino

Contratante: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCOP)  
Gobierno del Estado de Michoacán

Empresa: Laboratorio de Control y Análisis de Materiales

Fecha de informe: Marzo del 2009

Alcances:

- Determinar las propiedades índice y mecánicas del subsuelo
- Tipificación geotécnica de los materiales del subsuelo
- Cálculo de la capacidad de carga del terreno
- Diseño de pavimentos de vialidades
- Recomendaciones generales para el proceso constructivo
- Capacidad de carga y asentamiento del terreno para el viaducto
- Bancos de materiales para terracerías, pavimentos y concretos
- Taludes en cortes y terraplenes

Trabajos de campo (Anexos 1, 2 y 4):

- Excavación de 14 pozos a cielo abierto para las vialidades (PCA 1 a 12).
- Tres sondeos mixtos sobre el eje del túnel 1 (SM-1, SM-2 y SM-3)
- Tres sondeos mixtos para el viaducto (SM-4, SM-5 y SM-6)

- Tres sondeos mixtos sobre el eje del túnel 2 (SM-7, SM-8 y SM-9)

Los nueve sondeos cuentan con perfil estratigráfico, con descripción litológica, porcentaje de recuperación y RQD

Trabajos de laboratorio (Anexo 3):

- Se efectuaron diversos ensayos de laboratorio a suelos y rocas

## 2. Proyecto Ejecutivo de dos túneles carreteros del Libramiento Sur de Morelia

Contratante: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)  
Dirección General de Carreteras

Empresa: Consultec Ingenieros Asociados, S.C.

Fecha de informe: Julio del 2011

Objetivos:

- Elaboración del modelo geológico-geotécnico,
- Realizar el diseño de las obras de emportalamiento.
- Definir la geometría de las excavaciones
- Diseñar los sistemas de sostenimiento, el soporte temporal y el revestimiento de los túneles
- Indicar los procedimientos constructivos más convenientes

Trabajos de campo Túnel I:

- Levantamiento geológico superficial
- Cinco sondeos verticales (S-1 a S-5), con profundidades variables entre 22.50 y 70.0 m, a lo largo del eje del túnel.

Todos los sondeos cuentan con perfil estratigráfico, descripción litológica, porcentaje de recuperación, RQD y fotos de núcleos.

- Cuatro Tendidos sísmicos (T-1 a T-4), dos en cada portal
- Seis sondeos eléctricos verticales (SEV-1 a SEV-6)

Trabajos de campo Túnel II:

- Tres Tendidos sísmicos, uno en portal de entrada (T-5) y dos en el portal de salida (T7)

- Diez sondeos eléctricos verticales (SEV-7 a SEV-16)

Planos geológicos:

- Planta geológica general, escala 1:5,000
- Planta y perfil geológico
- Exploración geofísica
- Planta y perfil geotécnico

Planos constructivos:

- Secciones transversales en el interior del túnel y túneles falsos
- Secciones transversales en portales
- Obras de tajo por los portales
- Excavaciones del tajo por los portales
- Rellenos del tajo de acceso por los portales
- Secciones transversales del relleno por los portales
- Secciones transversales por portales
- Detalles de muros y anclas en portales
- Procedimientos constructivos en las diferentes condiciones geotécnicas en los portales y túneles.
- Plan de instrumentación y medición de convergencias
- Plano estructural de revestimiento al interior del túnel y túneles falsos
- Marcos metálicos
- Pavimento de concreto hidráulico
- Drenaje y desagüe pluvial
- Señalamiento

### 3. Proyecto de Terracerías del Libramiento Sur de Morelia

Contratante: Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)  
Dirección General de Carreteras

Empresa: Consultec Ingenieros Asociados, S.C.

Fecha de planos: Septiembre del 2011

Objetivos:

- Elaboración del proyecto de terracerías

Planos:

- Planos geométricos del trazo con planta topográfica y perfil topográfico por el eje del camino.

### 4. Planos topográficos

Contratante: Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas (SCOP)  
Gobierno del Estado de Michoacán

Empresa: Diseño e Ingeniería, S.A.

Fecha de plano:

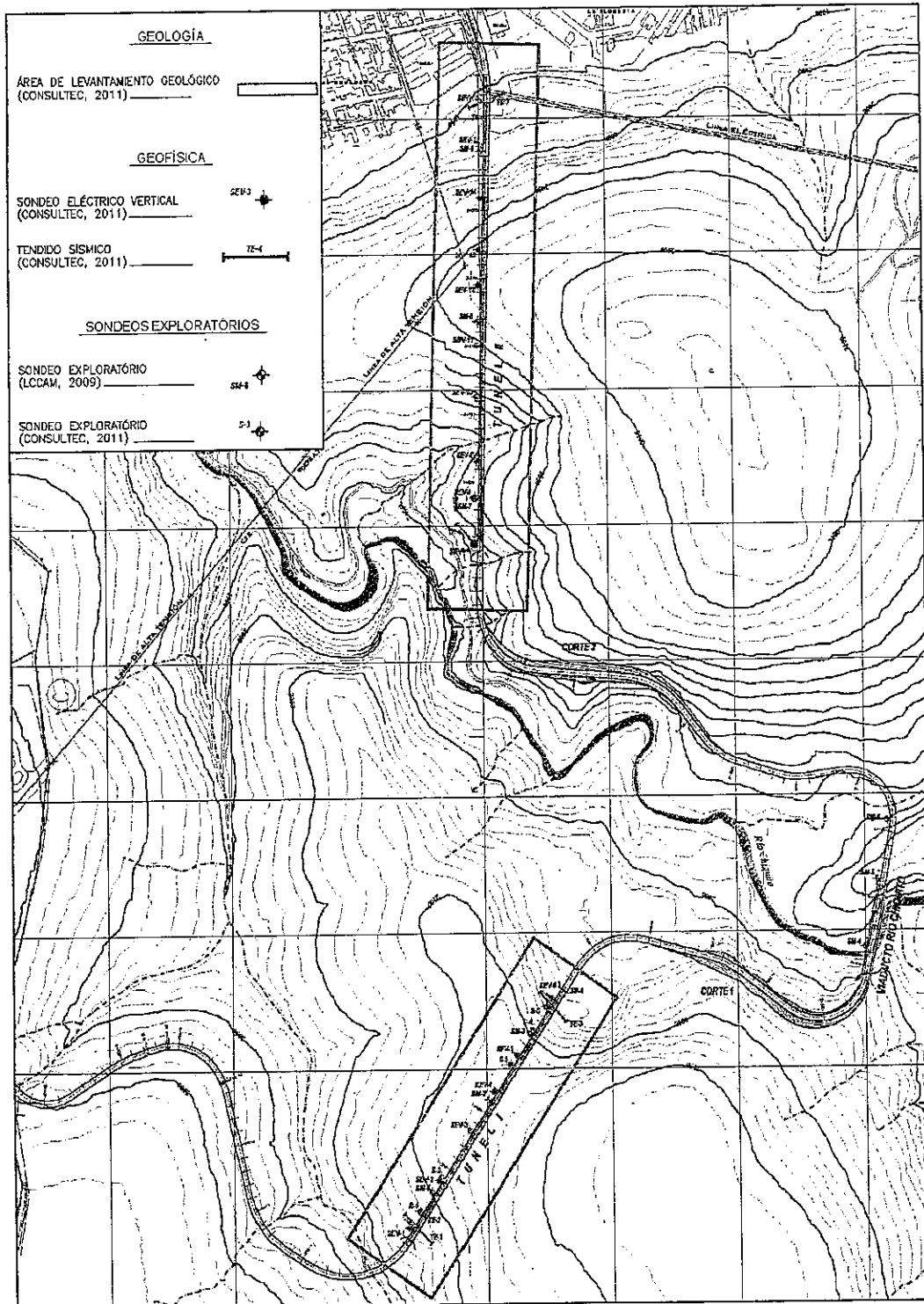
- Plano general topográfico, escala 1:5,000

Elaborado por restitución fotogramétrica de fotos aéreas escala 1:20,000, de fecha enero del 2000.

### 5. Fotografías aéreas

- Mosaico fotográfico a color de la zona sur de Morelia
- Fotos aéreas verticales, blanco y negro, escala 1:25,000, del año 1993

En la figura 2.1 se resumen las exploraciones geológicas y geofísicas realizadas en el estudio geotécnico del camino y en el proyecto ejecutivo (reducción del plano 2.1).



*Figura 2.1 Ubicación general de las exploraciones de los estudios previos  
(ver plano 2.1)*

### 3. GEOLOGIA

En este capítulo se presenta en primer término una breve descripción de la geología regional, abarcando aspectos estructurales, estratigráficos y de sismicidad; posteriormente se presenta la geología local, describiendo con detalle las unidades estratigráficas, fallas geológicas y los deslizamientos existentes en la zona.

#### 3.1 MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

El estado de Michoacán se ubica dentro de las provincias fisiográficas de la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico; la ciudad de Morelia se sitúa en esta última, muy cercana al límite entre estas provincias (Figura 3.1.1).

El Eje Neovolcánico de aproximadamente 920 km de longitud y una amplitud irregular entre 80 a 230 km de ancho, con una dirección E-W, está situado en la parte central del país, comienza en las costas del Pacífico y termina en las costas del Golfo de México. Una de las principales características fisiográficas de esta región son la presencia de grandes sistemas de fracturas y fallas que generaron grandes sistemas de horst y graben, estos últimos dan origen a grandes valles que se desarrollaron como cuencas que contienen depósitos de sedimentos lacustres, aluviales, fluviales y vulcano-sedimentarios.

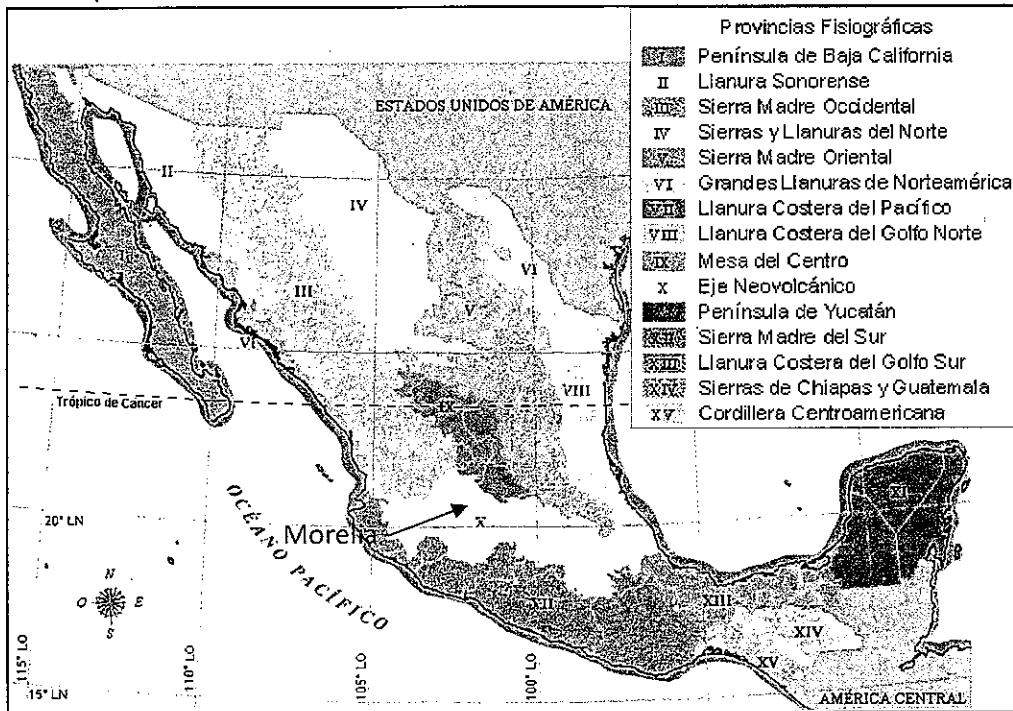


Figura 3.1.1 Provincias fisiográficas de México (INEGI)

Los hechos que definen a la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico poseen una complejidad geológica tal que constituye una de las principales provincias geológicas de México por sí misma, mejor conocida como Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) o Cinturón Volcánico Mexicano (CVM).

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es uno de los arcos volcánicos más variados y complejos del mundo. Su actividad ha ocurrido desde el Mioceno hasta el presente (Ferrari et al., 1999) y para su estudio se ha optado por subdividirla en tres sectores: una porción occidental que limita con la costa de Océano Pacífico; una porción central, en donde se ubica la zona de estudio y una porción oriental que limita con la costa del Golfo de México. Estos sectores presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química (Figura 3.1.2).

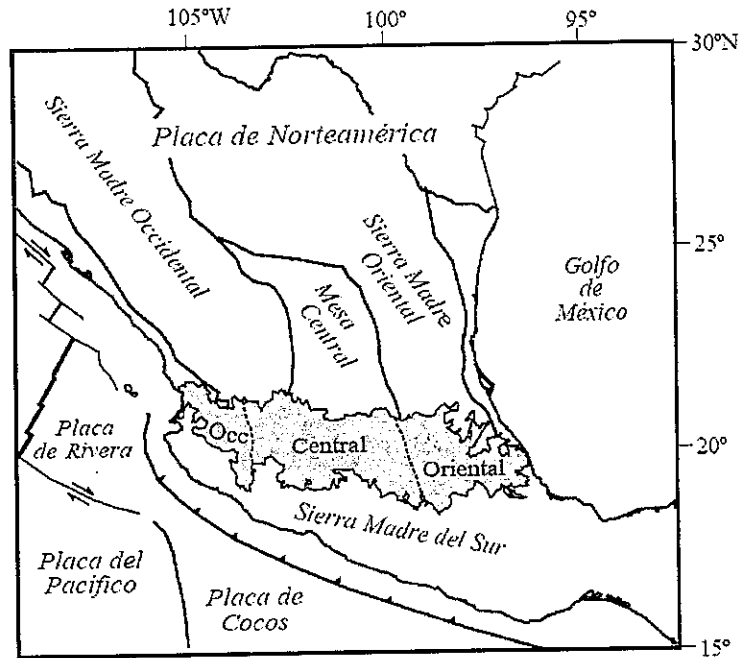


Figura 3.1.2 Provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana y los sectores en que se divide (Gómez-Tuena, 2005).

En la porción central de la FVTM se genera a partir del episodio máfico del Mioceno tardío al Plioceno temprano predominan las grandes calderas, como la de Atécuaro al sur de Morelia, que han producido tobas pumíticas e ignimbritas principalmente. A finales del Plioceno, el volcanismo se caracteriza por la formación de extensos campos volcánicos mono genéticos, como el Campo Volcánico de Michoacán-Guanajuato que tiene más de 1,000 volcanes, en un área de 40,000 km<sup>2</sup>.



## Geología Estructural

Los estudios de la geología estructural de la parte central de México (Martínez R. J. y Nieto S. A.F., 1990), ubican a la zona de la ciudad de Morelia en el Sector Central y principalmente en el Sistema de Fallas de Cuitzeo. En este sistema, las fallas son numerosas y de tipo normal con una orientación promedio de  $N65^{\circ}E$ ; los autores referidos mencionan que son raras las estructuras con orientaciones diferentes. Las fallas de este sistema se inclinan con gran ángulo, lo mismo al NW como al SE, dando lugar así a estructuras en pilares y fosas tectónicas. Las fallas de este sistema afectan a la secuencias de rocas volcánicas que varían en edad desde el Oligoceno hasta el Cuaternario; sin embargo, en la parte sur-occidental del sector, las fallas pierden definición y desaparecen debajo del grosor mayor del vulcanismo Cuaternario.

Martínez R. J. y Nieto S. A.F. (1990), refieren adicionalmente, que en las últimas épocas geológicas esta parte del país ha estado sometida a la acción de los esfuerzos tectónicos y deformaciones de un régimen tectónico distensivo hasta el Cuaternario; sin embargo, existen algunas zonas en donde las fallas cortan rocas terciarias pero no cuaternarias, lo que permite considerarlas como finiterciarias o, cuando mucho, pleistocénicas, como ejemplo estos autores mencionan la falla meridional de la fosa Tectónica de Cuitzillo, al NNW de la ciudad de Morelia. Esta falla desaparece debajo de los productos volcánicos Cuaternarios del Cerro del Quinceo sin cortarlos.

Del mismo modo existen fallas que se intersectan entre sí, evidenciando, de esta manera, que a lo largo de la región Central de México ha habido más de una orientación de la actividad tectónica en las últimas épocas geológicas. Finalmente, los autores referidos mencionan que este fallamiento facilitó además, la manifestación del vulcanismo Cuaternario en la región, retomando las fallas existentes para llegar a la superficie.

Por su parte otros autores (Garduño-Monroy V.H. et. al., 2009), ubican a este sector en el sistema de Fallas Morelia – Acambay (SFMA), Figura 3.1.3; este sistema consiste en una serie de fallas normales de dirección E-W y NE-SW que cortan la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano. El sistema de fallas se asocia a la formación de las depresiones lacustres de Chapala, Zacapu, Cuitzeo, Maravatio y Acambay.

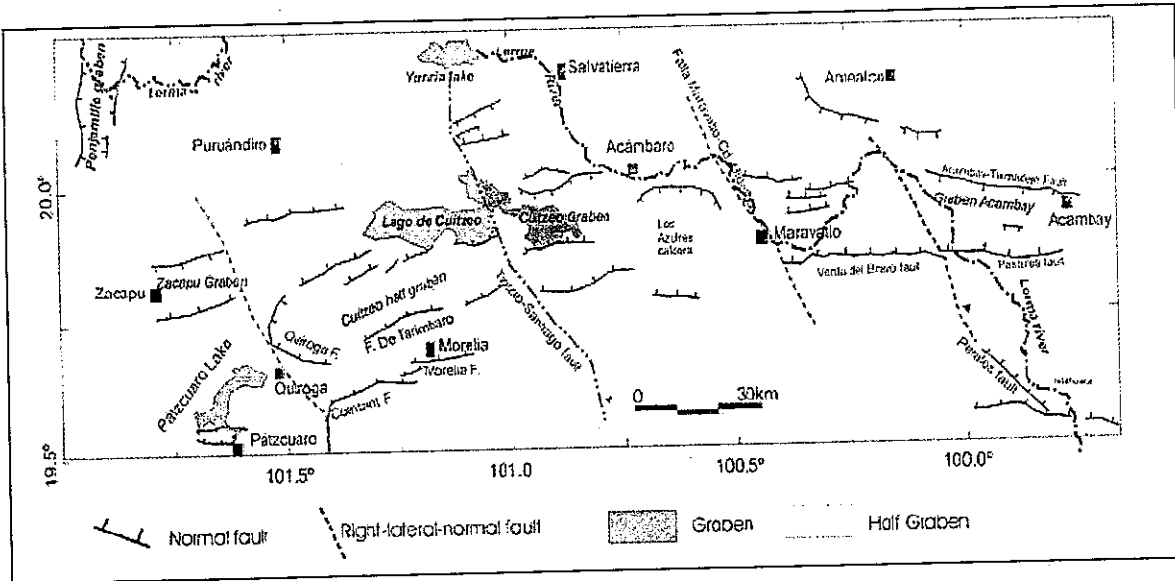


Figura 3.1.3 Marco Regional tectónico entre Pátzcuaro y Acambay, incluyendo la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy V.H. et. al., 2009).

Las fallas E-W de SFMA aparecieron hace 7-9 millones de años durante Mioceno temprano. Las fallas NNW-SSE son más viejas y se han reactivado en el tiempo, desplazando y controlando a las depresiones lacustres E-W; es decir, de acuerdo a Pasquare *et al.*, 1997 (en Garduño-Monroy V.H. et. al., 2009), estos sistemas de fallas más antiguas han sido reactivados como fallas laterales derechas a lo largo del tensor de deformación de la FVTM

Estos autores refieren fallas con orientación NW-SE cerca de la ciudad de Morelia como en la Sierra de Mil Cumbres donde estas fallas cortan la secuencia andesítica miocénica; al sureste de Morelia el cauce del Río Chiquito sigue fallas NW-SE; también en la zona de Indaparapeo - Atapaneo se reportan pequeñas fosas tectónicas, en donde las fallas que las limitan cortan flujos de lava, sedimentos lacustres y también fallas con orientación E-W.

### Fallas geológicas de la ciudad de Morelia

El límite meridional del grupo de fallas del Sistema de Cuitzeo, dentro del sistema de fallas Morelia - Acambay, lo constituyen las fallas de la ciudad de Morelia, ver figura 3.1.4, estas son de tipo normal y escalonadas hacia el norponiente con inclinaciones grandes de 80° y con orientación que tiende sensiblemente ENE-WSW.

La falla La Paloma, se manifiesta por el gran desnivel que se presenta entre la mesa de Santa María y la depresión de Morelia, con una dirección E-W; forma un escarpe de 200 m y tiene una expresión sobresaliente hacia el oriente, mientras que su altura va disminuyendo hacia el poniente. Al sur de Morelia, en el escarpe de Santa María, las fallas E-W dan lugar a varios desniveles, que son evidentes por formar escalones los cuales están asociados con pequeños deslizamientos del terreno. En el sector suroriental de la ciudad se pueden observar anillos de deslizamientos en masa.

En otro grupo se incluyen a estructuras que son paralelas a los sistemas de fallas geológicas regionales NE-SW, y que se desplazan continuamente por creep o por fluencia, afectando solamente a suelos y sedimentos fluvio-lacustres que forman el relleno de la cuenca de Morelia, los cuales se encuentran sobre antiguas trazas de fallas asociadas con el SFMA que están afectando a las rocas miocénicas. Su deformación se ha propuesto por la extracción de agua de los acuíferos que propician en los sedimentos una disminución de la presión de poro y por consecuencia en su espesor, por lo cual se comprimen y se hacen más delgados. En este tipo se encuentran las siguientes estructuras: Central Camionera, Torremolinos, Cuautla y Chapultepec (Garduño et. al. 2001).

### Estratigrafía

La Ciudad de Morelia se encuentra en el límite de dos provincias geológicas: la Sierra Madre del Sur (SMS), y Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) o Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Ambas regiones se caracterizan en la región de Morelia por presentar principalmente rocas volcánicas. Las más antiguas, pertenecientes a la SMS se encuentran parcialmente cubiertas por depósitos sedimentarios continentales. La unidad volcánica más reciente corresponde a productos del vulcanismo mono-genético del CVM.

Desde el punto de vista estratigráfico, se tienen cuatro grandes secuencias de materiales en la región de Morelia:

- **Secuencia Andesítica "Mil Cumbres" (Tm an).** La unidad volcánica que constituye el substrato más antiguo presente en el área es una secuencia de composición integrada por brechas y derrames andesíticos con intercalaciones de tobas y arenas volcánicas, tienen una edad comprendida entre 24 y 15 Ma. (SARH, 1977; Silva-Mora, 1979, 1995; Pascuaré et al., 1991) y un espesor mínimo de 800 m.
- **Secuencia Riolítica "Cantera de Morelia" (Tm r).** Sobre la unidad anterior, se encuentra una secuencia piroclástica de composición riolítica – dacítica, constituida por derrames riolíticos, ignimbritas y tobas pumíticas cuyo origen está ligado a una fase de actividad explosiva que dio lugar a la Caldera de Atécuaro, de edad inferior a los 15 Ma (Garduño-Monroy et al., 1999), con un espesor máximo

de aproximadamente 200 m. Esta unidad presenta rocas ignimbríticas y riolitas hacia la parte superior, en la parte intermedia conglomerados y brechas, y tobas pumíticas hacia la base.

- **Depósitos Lacustres (Q al).** Cubriendo parcialmente a las rocas volcánicas se tienen depósitos aluviales y lacustres, con espesores menores a 100 m; con una edad del Mioceno y Plioceno (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999).
- **Basaltos Cuaternarios (Qb).** La unidad más reciente es una secuencia de rocas volcánicas cuaternarias de composición basáltica y andesítica-basáltica, que provienen de los volcanes Cerro Quinceo y Cerro Las Tetillas pertenecientes al CVM.

Con objeto de mostrar las relaciones geológicas y estructurales entre las unidades litológicas antes mencionadas que afloran en la región de Morelia y parte alta de la zona de Cuitzeo, se elaboró un mapa geológico regional de la figura 3.1.5, el cual se basó en el mapa geológico de la Hoja Morelia 14Q-g(2), (Carta Geológica de México, escala 1:100,000, del Instituto de Geología de la UNAM, 1995); esta figura incluye además una sección geológica esquemática norte-sur, elaborada con base en los cortes litológicos de algunos pozos profundos existentes en la región de Morelia, que muestra la distribución de las unidades estratigráficas y la presencia de las fallas geológicas.

La parte alta de Morelia, conocida como Altozano, a una elevación de 2,200 msnm, se perforó el pozo Hoyo-2 a una profundidad de 400 m, el cual corta en su totalidad rocas asociadas a la Secuencia Andesítica "Mil Cumbres"; en los primeros 100 m está compuesta por brechas y piroclastos volcánicos andesíticos; por debajo, entre 100 y 200 m, se presentan derrames y brechas andesíticas, predominando los derrames en la porción media superior y a mayor profundidad se encuentran arenas volcánicas, brechas y derrames de composición andesítica.

En la porción meridional de la parte alta (Loma de Santa María) se tiene el pozo TEC, con una profundidad de 350 m; este pozo corta en sus primeros 130 m a la secuencia de riolítica "Cantera Morelia" y la porción inferior se emplaza en la secuencia andesítica, predominando los derrames fracturados hasta los 265 m y subyaciendo se presentan horizontes brechoides andesíticos.

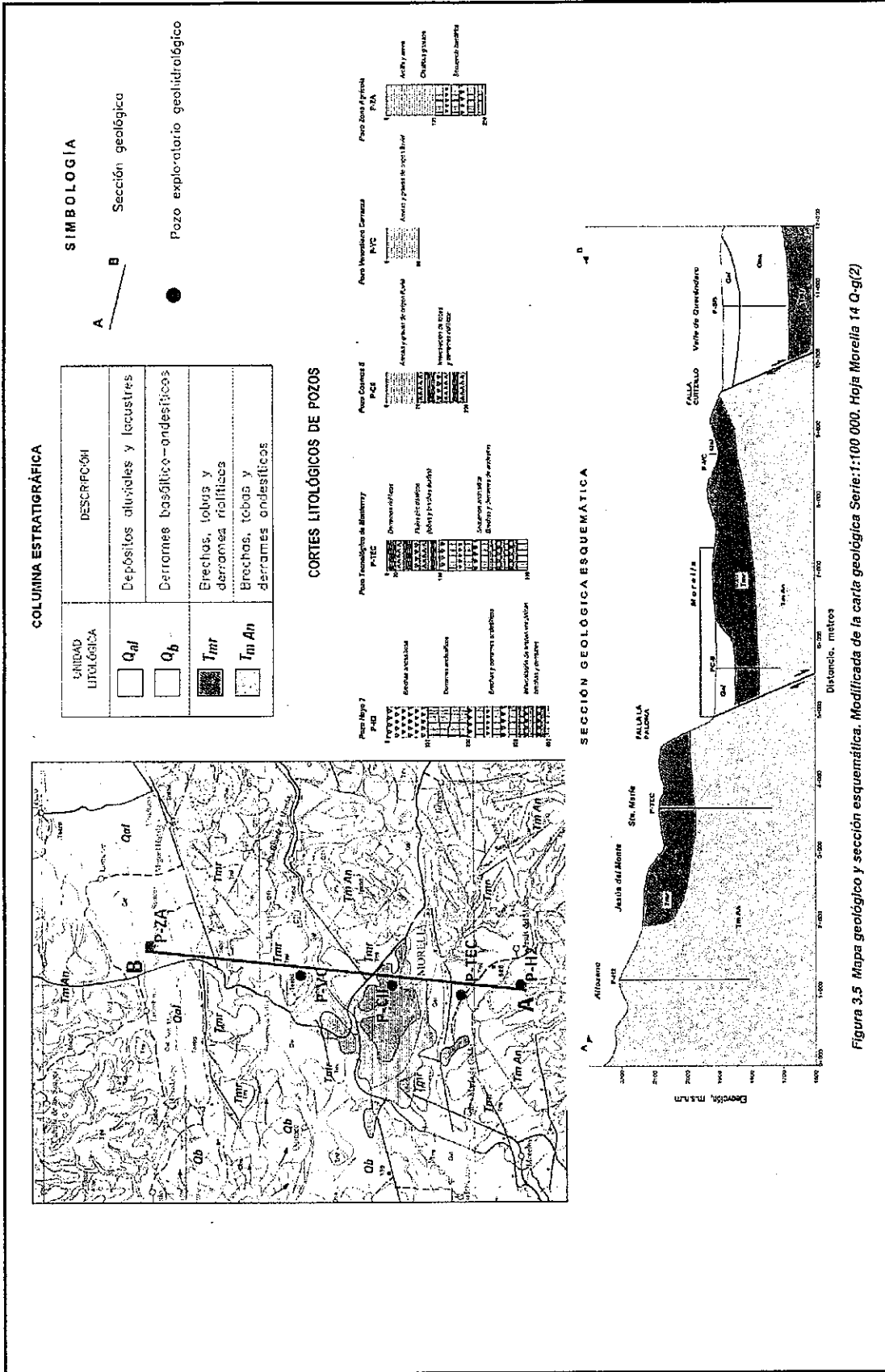


Figura 3.5 Mapa geológico y sección esquemática. Modificada de la carta geológica Serie:1:100 000. Hoja Morelia 14 Q-g(2)

Figura 3.1.5 Mapa geológico y sección esquemática de la zona de Morelia a Cuitzillo (modificado de la carta geológica de la UNAM)

En la parte del bloque caído de la Falla "La Paloma", en la ciudad de Morelia, se tiene el pozo Cosmos II perforado a los 200 m, el cual presenta en los primeros 76 m materiales clásticos (arenas y gravas de origen fluvial) que descansan sobre las rocas ácidas (tobas y derrames de la secuencia piroclástica riolítica).

La sección pasa hasta la zona de Cuitzillo, en donde aflora de nuevo la secuencia piroclástica riolítica en contacto con rocas de tipo andesítico (brechas), y se continua hacia el NNW para adentrarse en la zona del bloque caído de la zona de falla de Cuitzillo, en donde se tienen varias perforaciones (de 250 m de profundidad) que muestran horizontes potentes (entre 120 a 180 m de espesor) de materiales sedimentarios continentales: depósitos lacustres (arcillas y limos) sobre depósitos de relleno aluvial y fluvial (arenas y gravas) que descansan sobre rocas basálticas cuaternarias de espesor desconocido que deben descansar sobre rocas riolíticas.

Garduño et. al., 2001, con el apoyo de pozos de agua de la ciudad, presenta otra sección geológica (figura 3.1.6) que muestra de manera más específica, las fallas que cruzan la ciudad de Morelia, donde se aprecian los saltos y la configuración estructural del subsuelo a partir de la Falla La Paloma; al sur forman una serie de graben y horst que van cayendo al norte y que se pueden integrar de manera regional al modelo de la figura 3.1.5.

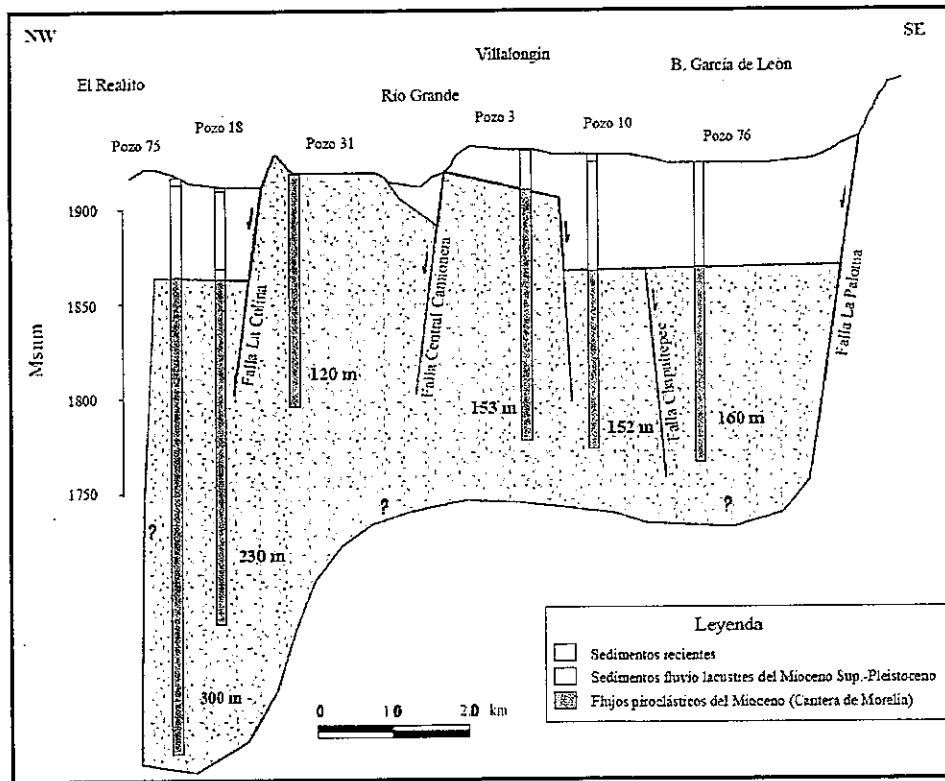


Figura 3.1.6 Sección en dirección norte-sur de la Cd. de Morelia, en la que se observa el fuerte salto de la falla La Paloma (Según Garduño et. al., 2001).

## Sismicidad

Las estructuras del Sistema de Fallas Morelia - Acambay (SFMA) en la región de Morelia-Cuitzeo han estado activas durante el Holoceno. Se tienen registros de sismos históricos localizados, por ejemplo, en las fallas E-W del campo geotérmico de Los Azufres; en la región de Pátzcuaro, las estructuras E-W de SFMA también se ligan a sismos fuertes ocurridos durante épocas prehistóricas e históricas.

Los sismos en la zona central FVTM están relacionados con la zona de subducción (fallas normales intraplaca superficiales (< 35 km de profundidad) y con sismos poco profundos del SFMA (Garduño-Monroy V.H. et. al., 2009). Esta actividad sísmica corrobora que los segmentos de E-W del SFMA pueden estar sometidos a un campo regional tensional de la FVTM, y que pueden ser reactivados en el futuro. En síntesis estos autores sugieren que la región es propensa a actividad sísmica intra-placas superficial.

En la zona de estudio, como se ha comentado, se tiene reportados algunos sismos históricos (1845 y 1858), sin embargo solo se tiene información de la intensidad percibida en ciertos puntos, lo que no da la certeza de la ubicación de los epicentros de estos sismos. El único sismo histórico cuyo epicentro es conocido es el del sismo de Acambay, ocurrido el 19 de noviembre de 1912 cuya magnitud se estima en 7.0, y que se ubica a 140 km aproximadamente al este del área de interés.

Con base en el catalogo de sismos del Servicio Sismológico Nacional (SSN), el cual cuenta con los registros de eventos de 1998 a la fecha, y tomando un radio de 100 km de la zona de estudio, se tiene registrados 32 sismos, 22 de estos en el presente siglo (ver Tabla 3.1.1).

Tabla 3.1.1 Sismos registrados de 1998 a la fecha, a un radio de 100 km de la zona de estudio.

#	Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad (Km)	Magnitud* (Mw)
1	1998-03-14	19.52	-100.34	15	4.3
2	1998-06-06	19.82	-100.3	3	3.7
3	1998-06-06	19.96	-100.69	4	3.7
4	1998-06-06	19.89	-100.64	4	4.0
5	1998-06-06	19.77	-100.43	11	3.8
6	1998-06-07	19.91	-100.3	5	4.3
7	1998-06-07	19.66	-100.37	3	4.0
8	1998-06-09	19.95	-100.36	5	4.1
9	1998-06-09	19.84	-100.35	3	3.9
10	1998-06-09	19.69	-100.84	6	3.9
11(A)	2000-06-03	19.84	-100.25	3	3.9
12 (B)	2000-11-19	19.54	-102.05	56	4.0
13 (C)	2000-11-19	19.85	-102.01	42	4.1
14 (D)	2002-09-04	19.82	-101.25	10	4.1
15 (E)	2003-12-05	19.78	-101.29	5	4.2
16 (F)	2005-02-20	19.6	-102.07	73	4.1
17 (G)	2005-08-31	19.94	-100.36	5	3.7
18 (H)	2005-09-21	19.88	-101.05	5	3.9
19 (I)	2006-03-01	19.62	-100.91	10	3.6
20 (J)	2004-04-30	19.99	-100.84	15	4.2
21 (K)	2007-07-20	19.47	-100.37	6	3.9
22 (L)	2007-10-17	19.65	-101.03	5	3.8
23 (M)	2007-10-17	19.72	-101.15	1	3.6
24 (N)	2007-10-17	19.71	-101.17	5	3.5
25 (O)	2007-10-17	19.67	-101.27	6	3.5
26 (P)	2008-03-01	19.44	-100.41	19	3.9
27 (Q)	2008-05-28	19.5	-100.33	5	3.7
28 (R)	2008-07-20	19.54	-100.36	58	3.6
29 (S)	2009-05-03	19.31	-100.32	4	3.5
30 (T)	2009-07-26	19.92	-100.95	10	3.8
31 (U)	2010-04-19	19.14	-101.71	35	3.7
32 (V)	2010-11-17	18.81	-101.0	3	3.3

\*Mw: magnitud de momento sísmico, basada en la medición de la energía total que se libera en un terremoto (en escala logarítmica) fue introducida en 1979 por Thomas C. Hanks y Hiroo Kanamori como la sucesora y similar a la escala de Richter



Con base en los datos registrados por el Sismológico Nacional, se observa en la gráfica de la Figura 3.1.7 que la profundidad de la mayoría de estos sismos es muy somera, entre 1 y 10 km, y sus magnitudes son bajas de entre 3.3 y 4.3. Este tipo de sismos (corticales) son eventos con magnitudes considerablemente menores a las de los sismos de subducción. Sin embargo, debido a que son superficiales y ocurren principalmente a lo largo del Eje Volcánico Mexicano, conllevan un alto riesgo en virtud de que en esa franja del país se concentran la mayoría de la población del territorio nacional.

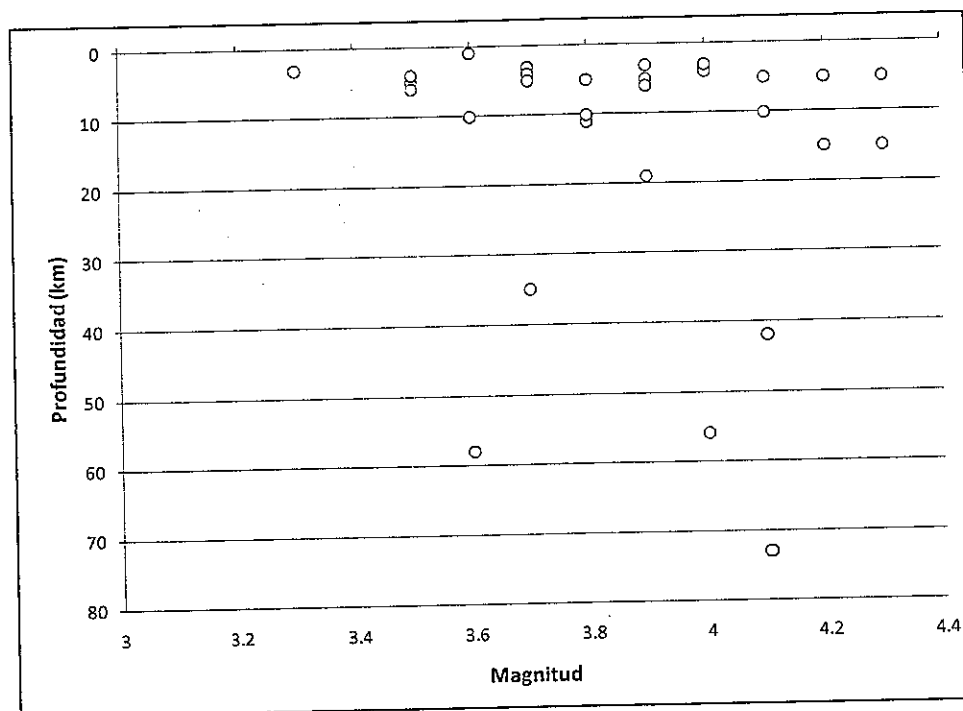


Figura 3.1.7 Relación entre la magnitud y profundidad de los sismos

La ubicación de los epicentros de estos sismos se puede apreciar en la figura 3.1.8, se desprende que la mayoría de los sismos se localizan al este de la Ciudad de Morelia, principalmente a lo largo del graben de Acambay.

Los más cercanos que recientemente se han presentado en la ciudad de Morelia (octubre de 2007) tuvieron magnitudes que varían desde 3.5 hasta 3.8, con profundidades entre 1 y 6 km; estos eventos someros, obviamente no están relacionados con fenómenos de subducción, más bien pudieran relacionarse con los segmentos de E-O del Sistema Acambay (SFMA), los epicentros se localizaron al sur de la falla denominada Central Camionera.

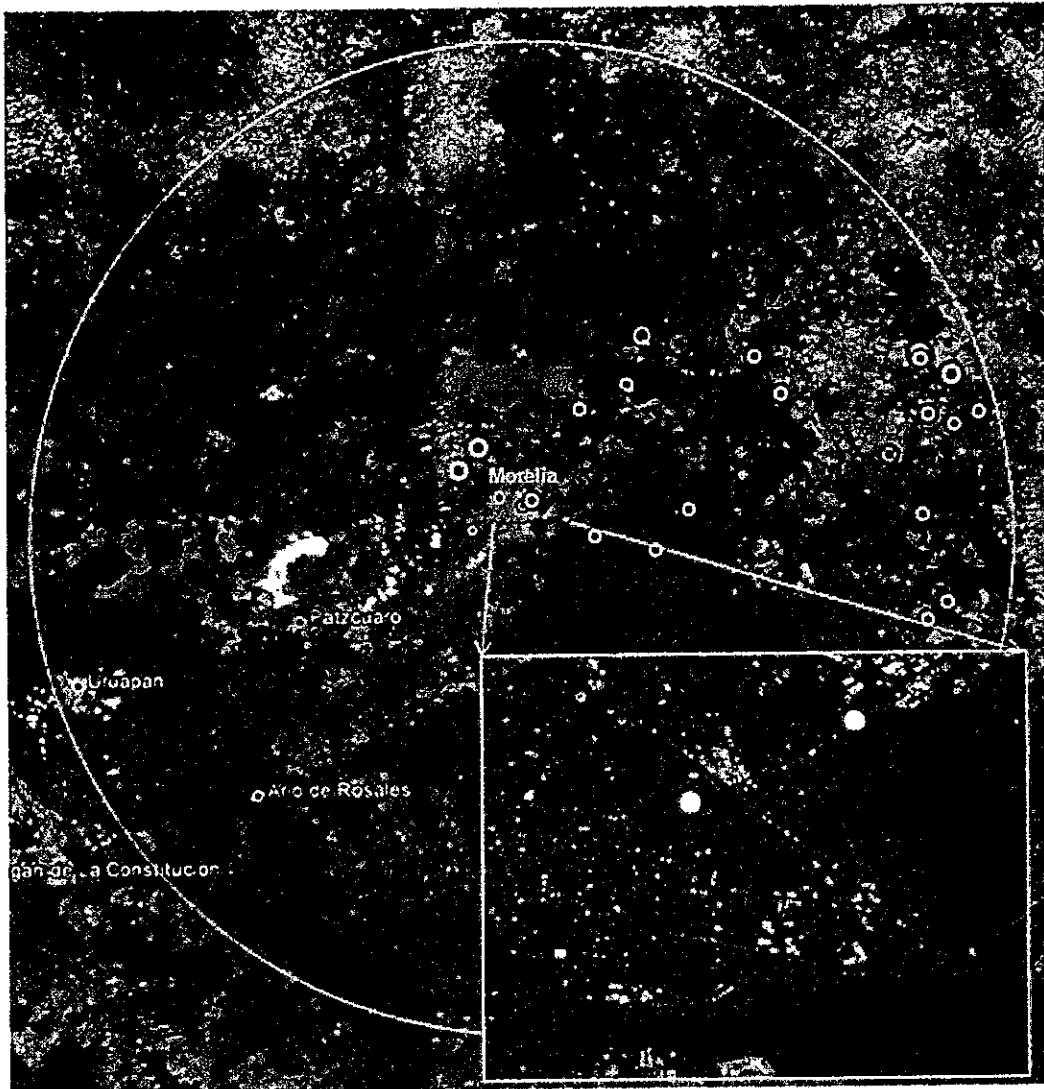


Figura 3.1.8 Distribución de los sismos cercanos al área de estudio. En el recuadro los de la ciudad de Morelia (2007). El radio de los círculos corresponde a la magnitud (entre 3 y 4.5), los colores indican profundidades (amarillo < 10 km; verdes entre 10 y 30 km y rojos mayores a 30 km)

## 3.2 GEOLOGÍA DE LA ZONA DEL PROYECTO

El proyecto se localiza en una zona de fuertes pendientes, donde se pretende construir un camino de 2.3 km de desarrollo y que descenderá 190 m desde la Loma de Santa María ubicada en la cota 2,110 m, hasta la colonia Ejidal Ocolusen en la cota 1,920 msnm. El origen de la loma y el desnivel se debe a la actividad volcánica y al salto de cerca de 200 m de la Falla La Paloma, la cual ha sido afectada por la erosión y el intemperismo dejando una topografía accidentada.

El modelo geológico que a continuación se presenta está apoyado en el análisis de la información geológica existente, en la interpretación de fotografías aéreas e imágenes satelitales y en los levantamientos geológicos de campo realizados en este estudio; sin embargo también se contó con información del subsuelo a partir de los perfiles estratigráficos de los diversos sondeos exploratorios realizados principalmente en los túneles, así como de los estudios geofísicos (sísmico y eléctricos) realizados para el proyecto ejecutivo de los túneles más los efectuados en este estudio.

En primer término se presenta una descripción de cada una de las unidades estratigráficas diferenciadas, posteriormente se analizan las fallas y fracturas que afectan la zona de estudio, y se concluye con una descripción de los deslizamientos existentes en la zona del portal de salida del túnel II.

En este estudio se elaboró un mapa geológico que muestra la distribución superficial de las diferentes unidades estratigráficas y rasgos estructurales en toda la zona que cubre las obras del Ramal Camelinas (Plano 3.1).

También se realizaron tres secciones geológicas que ilustran la probable distribución en el subsuelo de cada unidad, así como la posición de las fallas y fracturas; estas secciones se programaron a lo largo de los túneles (Plano 3.2).

Por último, se elaboró un plano de mayor detalle geológico en la zona del portal de salida del túnel II, donde se presentan los deslizamientos de Ocolusen, de manera de poder ilustrar mejor su distribución y relaciones entre ellos (Plano 3.3)

Las características y descripción de los materiales y de las discontinuidades se han basado en las propuestas planteadas por la ISRM, (1981); se incluyen en el anexo 3.3.

### 3.2.1 Estratigrafía

Las rocas que se presentan en el área de estudio son de origen volcánico andesítico-riolítico y sedimentario continentales, de edad miocénica, así como de rocas sedimentarias plio-cuaternarias producto de la erosión, depósito y deslizamientos clásticos fluviales, lagunares y de talud.

Los materiales que afloran en la zona de estudio se dividieron en cuatro (4) unidades volcánicas terciarias y seis (6) unidades de depósitos sedimentarios cuaternarios, las cuales de la más antigua a la más joven son:

- Brechas volcánicas, tobas y derrames andesíticos (TM bv-an).
- Tobas pumíticas (TM tp).
- Conglomerados y brechas (TM cg).
- Ignimbrita (TM ig).
- Depósitos cuaternarios (Q):
  - Depósitos fluviales (Q df),
  - Depósitos lacustres (Q l),
  - Depósitos talud (Q t),
  - Abanicos aluviales (Q a),
  - Depósitos coluviales producto de deslizamientos de la secuencia riolítica (Q dr).
  - Depósitos coluviales de deslizamientos de la secuencia andesítica (Q da)

La figura 3.2.1 muestra la columna estratigráfica del área de estudio, donde se indican las unidades litológicas, edades, formaciones geológicas y tipo de rocas.

UNIDADES LITOLÓGICAS







UNIDAD LITOLÓGICA	EDAD	FORMACIÓN GEOLÓGICA	LITOLOGÍA
 $Q_d$	CUATERNARIO		DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTOS
 $Q_a$			ABANICOS ALUVIALES
 $Q_t$			DEPÓSITOS DE TALUD
 $Q_l$			DEPÓSITOS LACUSTRES
 $Q_{df}$			DEPÓSITOS FLUVIALES
 $TM_{ig}$	MIOCENO	SECUENCIA RIOLÍTICA	IGNIMBRITA
 $TM_{cg}$			CONGLOMERADOS Y BRECHAS
 $TM_{tp}$			TOBAS PUMITICAS
 $TM_{bv-an}$		SECUENCIA ANDESÍTICA	BRECHAS VOLCÁNICAS, TOBAS Y DERRAMES ANDESÍTICOS

Figura. 3.2.1 Columna estratigráfica del área de estudio

• Brechas volcánicas, tobas y derrames andesíticos (TM bv-an)

Esta unidad forma parte de la Formación Mil Cumbres, descrita por Demant 1981, Silva – Mora 1979-1995 y Pasquaré *et. al.* 1991. La definen como un paquete de lavas andesíticas de color verde, intensamente alteradas y fracturadas, que a menudo alternan con horizontes piroclásticos o con derrames de composición más máfica.

En el sitio de interés, esta unidad aflora ampliamente en la ladera de la falla La Paloma y a lo largo de las dos márgenes del Río Chiquito, en estos sitios está constituida por brechas volcánicas, tobas y coladas andesíticas (ver Plano 3.1).

Con base en las observaciones realizadas la unidad (TM bv-an) se ha podido subdividir en dos secuencias, un inferior y otra superior con características diferentes.

### *Unidad andesítica inferior - piroclásticos (Tpc)*

La Unidad Inferior y más antigua, se observó exclusivamente en los cortes del camino de acceso al fraccionamiento Cumbres de las Américas, donde se observa el contacto con la unidad superior de brechas volcánicas, tobas y derrames andesíticos (TM bv-an). Estos afloramientos, aunque están retirados del orden de 1,000 m del Túnel II, son muy ilustrativos ya que cortan parte la secuencia litológica de esta unidad, y donde se puede observar con detalle los horizontes de brechas, coladas y tobas volcánicas.

Los materiales que componen esta unidad inferior son piroclásticos, formados por brechas volcánicas de color gris claro a amarillenta, de composición mas acida (Foto 3.2.1), con bloques de 5 a 20 cm y hasta más grandes de 50 cm de diámetro, empaçados en una matriz arenosa, poco consistente y medianamente cementadas (Fotos 3.2.2 y 3.2.3);

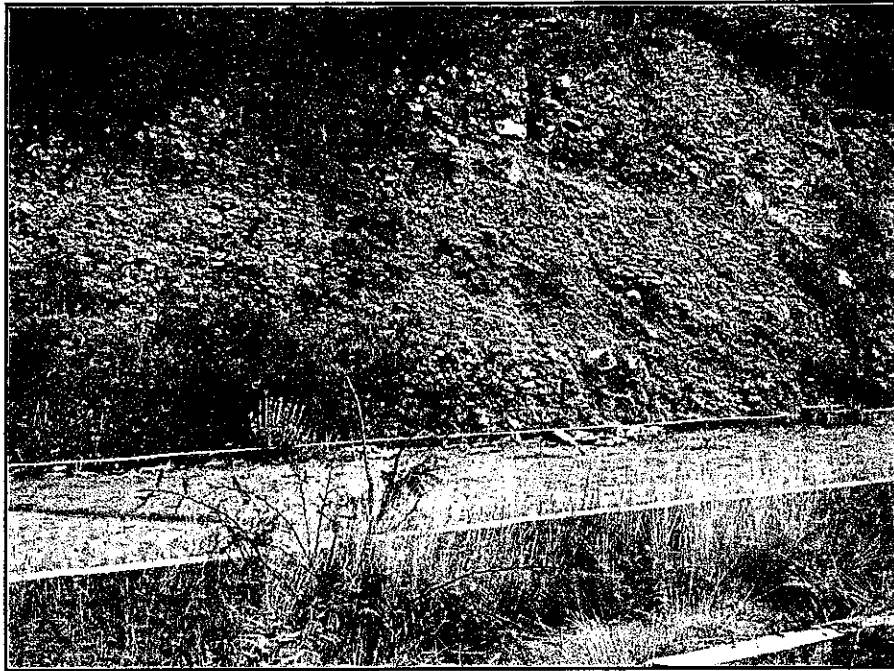
Esta unidad subyace a la secuencia más joven de brechas, tobas y derrames andesíticos más oscuros, similares a los que se presentan en la zona del proyecto y en el rio Chiquito.

Los materiales presentan una estratificación burda, graduada con los bloques más grandes abajo y más finos arriba hasta terminar con una secuencia tobácea amarillenta y no presenta planos de fractura (Foto 3.2.2).

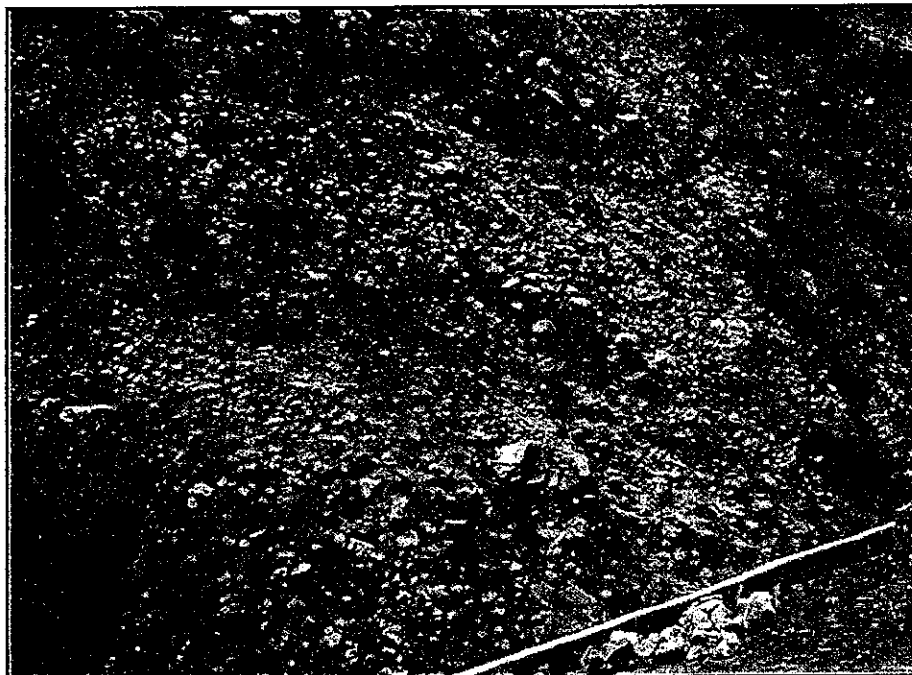
Esta unidad se encuentra inclinada hacia el SW, lo cual puede corresponder a un basculamiento de los estratos como consecuencia del deslizamiento existente en el camino a Cumbres de Morelia, o bien podrían ser su inclinación natural (Foto 3.2.1).



*Foto 3.2.1 Parte de la unidad inferior de brechas volcánicas claras, medianamente cementadas, pseudoestratificada e inclinada hacia el SW. Se aprecia el contacto superior con la secuencia de brechas oscuras, característica de la Secuencia andesítica. Abajo del contacto se observa un horizonte tobácea alterado amarillento de baja resistencia.*



*Foto 3.2.2 Vista de la unidad inferior de unidad (TM bv-an) de brechas con pobre a mediana cementación. Nótese la burda seudoestratificación que presenta.*



*Foto 3.2.3 Acercamiento donde se aprecian los bloques angulosos de 5 a 20 cm de diámetro empacados en una matriz arenosa poco consistente.*

### *Unidad superior de brechas, tobas y derrames andesíticos (Tm bv-an)*

La unidad superior está conformada por brechas, tobas y coladas andesíticas de color gris y café ocre más oscuras, presenta una amplia exposición en la mayor parte del área de estudio y cubre de manera discordante a la unidad inferior de piroclastos claros.

#### **Brechas volcánicas**

Las brechas están constituidas de fragmentos angulosos de andesita, cuyos tamaños varían de milímetros a 2.0 m de longitud, predominando entre 3 y 20 cm, se encuentran bien consolidadas, compactas y poco fracturadas (foto 3.2.4 y 3.2.5).

Las brechas están bien compactas y unidas, también poco alteradas a moderadamente meteorizadas confiriéndoles una resistencia moderadamente duras.

#### **Andesitas**

Presenta intercalaciones de derrames de andesita de color gris oscuro, de textura afanítica, en general se encuentra poco alterada a sana y esta fracturada; los derrames tienen espesores de 3 a 7 m, aunque localmente como ocurre en el cauce del Río Chiquito donde predominan los derrames y pueden ser de decenas de metros (foto 3.2.6), o bien pueden tener unos cuantos metros y desaparecen dentro de las brechas.

Las coladas de andesita son rocas ligeramente alteradas a sana, de resistencia moderadamente duras a dura que requiere de uno a varios golpes del martillo para fracturarlas, con velocidades sísmicas que varían de 678 m/s en roca alteradas y descomprimida, a más de 2700 m/s en estado sano, con superficies rugosas ligeramente alteradas y bloques irregulares a través de tres familias de discontinuidad.

#### **Tobas**

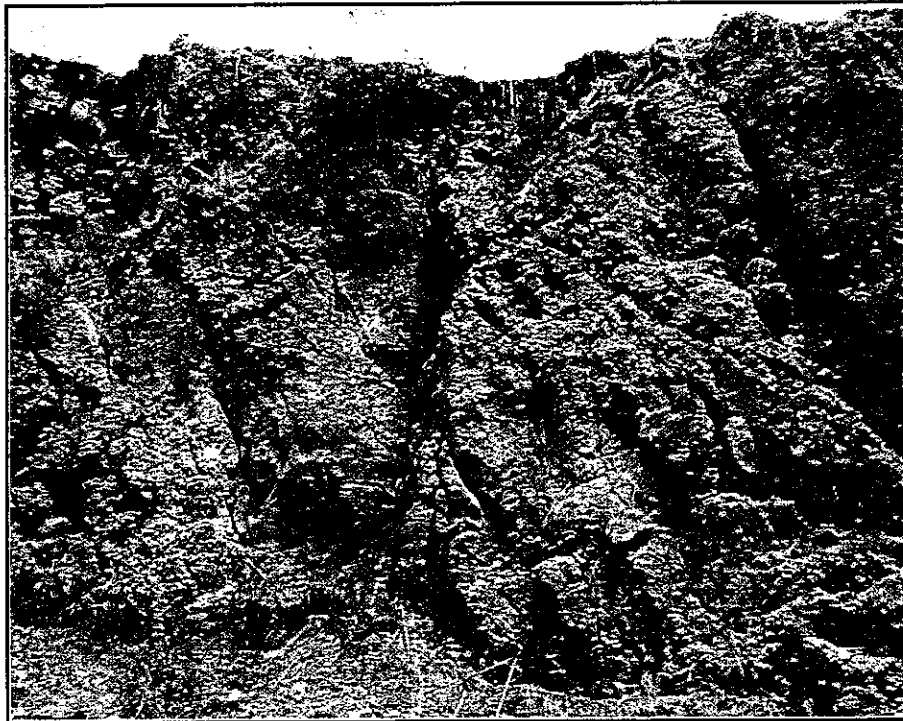
Esta secuencia también presenta intercalaciones de tobas constituidas de cenizas de tamaño medio a fino de color café claro, la roca en estado fresco es de color gris oscuro que cambia por intemperismo a tonos rojizos (foto 3.2.7).

Mientras que los horizontes tobaceos son menos resistentes, considerándose a partir de índices de campo como roca blanda a muy blanda. Se puede considerar que el macizo rocoso está parcialmente alterado y roca de buena calidad con superficies con separación moderadamente junta a separada, rugosas y ligeramente alteradas.

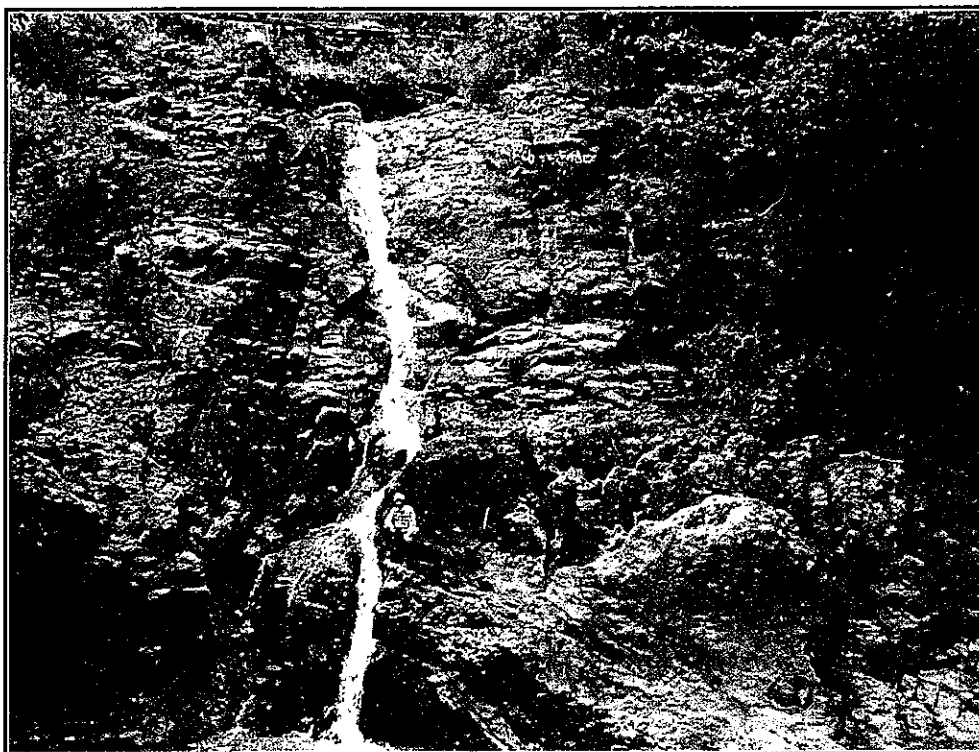




*Foto 3.2.4 Brecha volcánica de composición andesítica en la margen izquierda del río Chiquito.*



*Foto 3.2.5 Brecha volcánica de composición andesítica en el corte de una terracería para el fraccionamiento Cumbres de América*



*Foto 3.2.6 Derrame de andesitas potente en el cauce del Río Chiquito*



*Foto 3.2.7 Tobas intercaladas con las brechas y derrames en el camino del paseo del Río Chiquito.*

El contacto inferior de esta unidad no aflora en la zona de estudio, solo se observa en el contacto superior de la unidad inferior de brechas claras con la unidad de brechas oscuras (foto 3.2.8); mientras que el contacto superior de esta unidad es discordante con la Secuencia de rocas riolíticas, específicamente de la unidad de tobas pumíticas (TM tp).

El espesor calculado de la unidad andesítica en la zona de estudio es de 120m, aunque el espesor total es mucho mayor de acuerdo a lo reportado en trabajos previos.

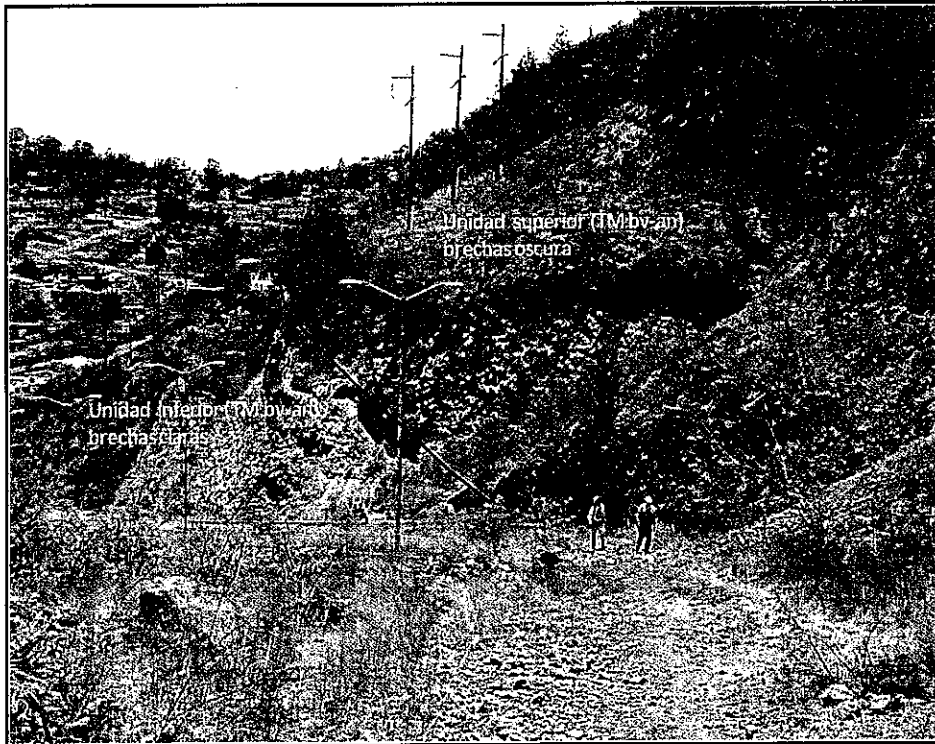


Foto 3.2.8 Vista del contacto entre dos paquetes de la unidad TM bv-an.

Las rocas andesíticas se encuentran fracturadas, tanto en las brechas volcánicas como en los derrames de andesitas, en los cuales se aprecian tres familias (F) principales, cuyas orientaciones son: F1: 40 a 80°, F2: 270 a 210°; F3: 350 a 30°, mismas que se indican en la roseta de fracturas de la figura 3.2.2.

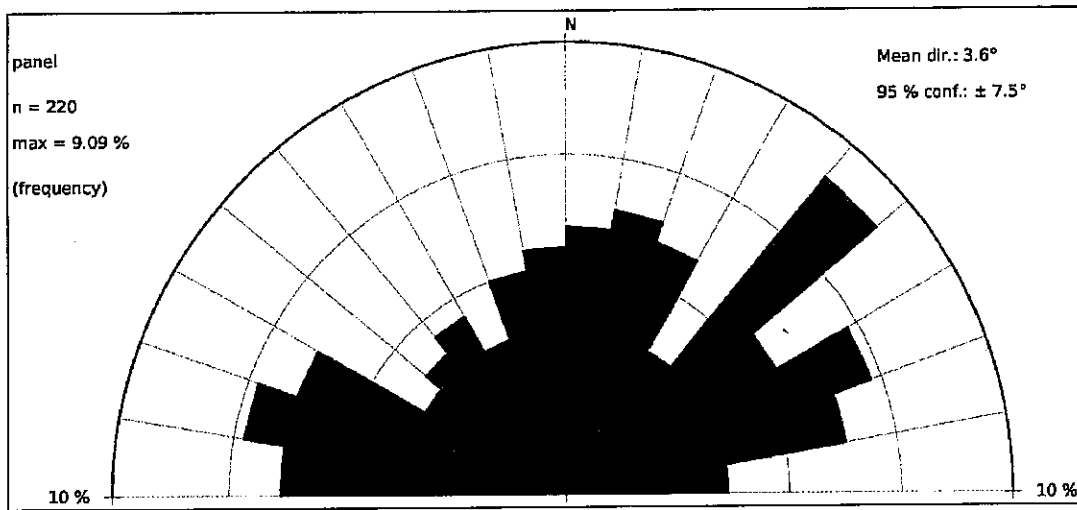


Figura 3.2.2 Roseta en donde se muestran tres familias principales de fracturamiento en la secuencia andesítica.

En las fotos 3.2.11 y 3.2.12, muestran los sistemas de fracturamiento preferencial y su espaciamiento.



Foto 3.2.11 Fracturamiento afectando a las brechas volcánicas con intercalaciones de derrames andesíticos en el camino hacia los Filtros Viejos.



Foto 3.2.12 Derrame andesítico afectado por fracturamiento en el Río Chiquito.

- **Tobas pumíticas (TM tp)**

La toba pumítica corresponde a la unidad inferior de la secuencia de rocas riolíticas de la "Cantera Morelia", se puede observar en el camino que sube hacia la Loma de Santa María en la porción oeste de la traza de la Falla La Paloma, así como en la porción superior de ambas márgenes del río Chiquito y al descender por los arroyos de orientación SW-NE afluentes del Río Chiquito, que son sensiblemente perpendiculares al escarpe norte-sur de dicho río (ver Plano 3.1).

En general forma relieves con pendientes suaves. Tiene un espesor de  $\pm 35$ -m en la zona del proyecto y el contacto inferior es discordante con la unidad de brechas volcánicas, tobas y derrames andesíticos (TM bv-an), mientras que el contacto superior con los conglomerados (TM cg) también es discordante (foto 3.2.13).

Se trata de un flujo piroclástico de color blanco a rosa, de muy baja densidad debido a su contenido de pómez de grano grueso a medio de hasta 4 cm (foto 3.2.14). La toba está ligeramente a medianamente intemperizada, aunque está compacta su resistencia se considera blanda a muy blanda ya que el martillo deja pequeñas marcas o se disgrega con la punta del martillo, la separación de las discontinuidades es separada a muy separada.

En láminas delgadas analizadas con microscopio petrográfico se puede observar que esta unidad está constituida por plagioclasas, cuarzo, feldespato potásico, piroxenos, con una

matriz vítrea formada por espículas de vidrio (pómez fragmentada) y fiammes (pómez colapsada) parcialmente desvitrificados a cuarzo y feldespatos.



Foto 3.2.13 Contacto geológico entre la toba pumítica y los conglomerados arriba sobre el arroyo de la Falla Seminario.



Foto 3.2.14 Afloramiento de la toba pumítica en la margen izquierda del río Chiquito a unos 260 m al norte del portal de salida del Túnel I.

Esta unidad presenta también tres familias de fracturas casi verticales y cuyas direcciones preferenciales son: F1: 40° a 70° y F2: 270 a 290° y F3: 330° a 010°, como se puede observar en la roseta de la figura 3.2.3.

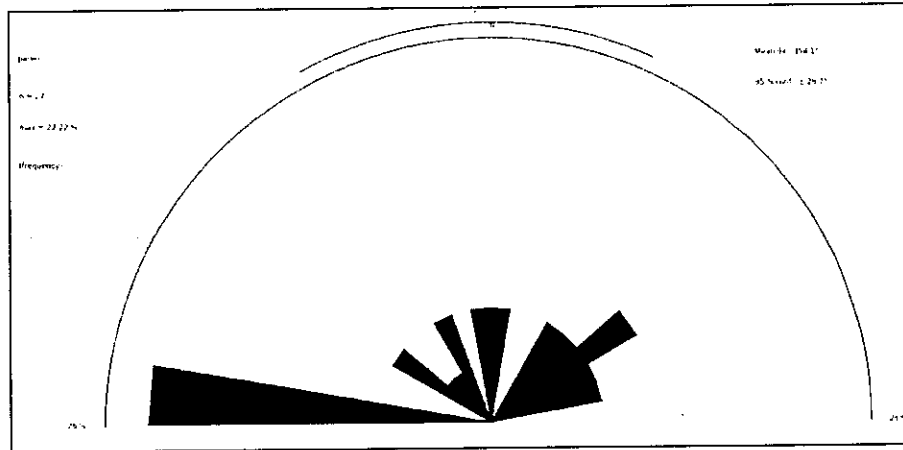


Figura 3.2.3 Roseta de rumbos realizada con los datos obtenidos en la toba pumítica en el camino hacia Altozano.

Se presenta en bloques separados por fracturas de ángulo alto (fotos 3.2.15 y 3.2.16) en una zona con inestabilidad en el terreno, ya que se aprecian zonas de derrumbes con bloques de diversos tamaños en la zona de mayor pendiente.



Foto 3.2.15 Toba pumítica donde se aprecian los dos sistemas de fracturas ilustrados en la roseta de rumbos de la Figura 3.2.3.



Foto 3.2.16 Detalle donde se aprecian dos sistemas de fracturas verticales.

- **Conglomerados y brechas (TM cg)**

Arreygue Rocha en 2001, indica que cubriendo a la secuencia piroclástica descrita por Garduño Monroy et. al. en 1999, se encuentran un nivel de conglomerados y brechas con un espesor de 20 a 40 m, los cuales le sobreyacen por un nivel continuo consolidado y fracturado de ignimbrita soldada.

Este conglomerado se observo en la parte oriente de la zona conocida como Loma Larga y en la margen izquierda del río Chiquito, a lado del portal de salida del Túnel I (foto 3.2.17), así como en el arroyo que forma la Falla Seminario en la margen izquierda del arroyo Chiquiton donde existen muy buenos afloramientos (ver Plano 3.1).

El contacto inferior es discordante con la toba pumítica (TM tp) como se puede apreciar en la foto 3.2.20, también el contacto superior es discordante con la ignimbrita (TM ig).

Por las observaciones de campo y la información disponible, parte del Túnel I se excavaría en esta unidad a partir del portal de entrada hasta antes de la Falla Altozano. En la zona de estudio se puede estimar que la unidad tiene un espesor de  $\pm 20$ -m.

Consiste de un conglomerado polimíctico compuesto de fragmentos subredondeados a redondeados de toba pumítica y en menor proporción de andesita; el tamaño de los clastos varía de 2 a 40 cm de diámetro, predominando los de 3 a 10 cm (foto 3.2.18); estos fragmentos están grano-soportados y la matriz es de arena de grano grueso de composición pumítica (foto 3.2.19), en los núcleos de roca del barrenos SM-1 y SM-2 del túnel I, se observo que este horizonte presenta un aspecto brechoide.

Los conglomerados están pobremente estratificados, compactos y ligeramente a moderadamente meteorizados y de resistencia moderadamente dura que requiere varios



golpes del martillo para separarse, con velocidades sísmicas que rondan los 1200 m/s. El espaciamiento de las fracturas es separado a muy separado.



Foto 3.2.17 Afloramiento de conglomerados con un espesor de  $\pm 5$  m sobre la margen izquierda del río Chiquito, a lado izquierdo del portal de salida del Túnel I.



Foto 3.2.18. Horizonte de conglomerados polimíctico en el arroyo que forma la Falla Seminario, constituidos de fragmentos subredondeados a redondeados de 2 a 40 cm



Foto 3.2.19 Conglomerado polimíctico con fragmentos de toba subredondeados y matriz arenosa.



Foto 3.2.20 Conglomerado polimíctico en contacto inferior con la toba pumítica

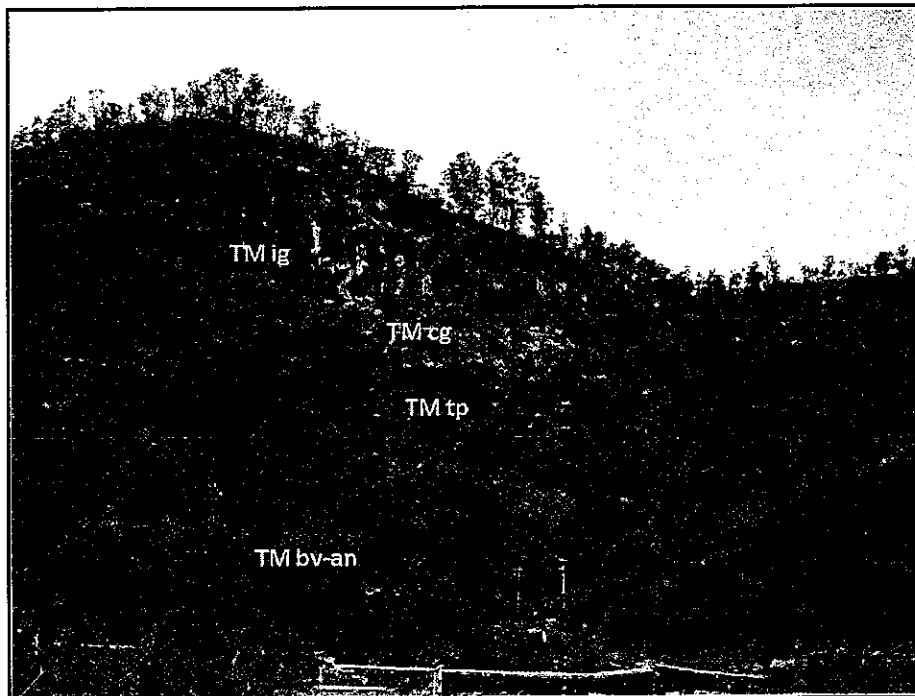
- **Ignimbrita (TM ig)**

Fue descrita anteriormente por Garduño – Monroy et. al. 1999 y Pasquaré en 1991, como parte de una secuencia piroclástica denominada Ignimbrita de Morelia (Cantera de Morelia), la cual consiste de una toba soldada de color rosa con grandes fiammes de pómez. Esta unidad forma pendientes casi verticales como se puede apreciar en la porción superior por los cantiles expuestos a lo largo de la margen izquierda del río Chiquito.

La ignimbrita aflora en ambas márgenes del río Chiquito, (foto 3.2.21) presenta buenos afloramientos en la parte alta de la Loma de Santa María y en la meseta denominada Loma Larga, así como coronando la porción superior de Parque Ecológico Francisco Zarco (ver Plano 3.1). Se le ha calculado un espesor de más de 80 m en la zona de estudio.

El Túnel I cruzará la unidad ignimbritica a partir de la Falla Altozano; en el Túnel II se presenta en la parte alta del cerro, por lo que no la cortará.

El contacto inferior de las ignimbrita (TM ig) es discordante con los conglomerados (TM cg) que subyacen, mientras el contacto superior es también discordante con una toba blanca denominada Toba La Alegría que aflora al poniente de la zona de estudio (Foto 3.2.21).



*Foto 3.2.21 Panorámica de la margen izquierda del río Chiquito, donde se puede apreciar en la porción superior los afloramientos de la Ignimbrita (TM ig)(escarpes pronunciados), en la parte media superior los Conglomerados (Tm cg), en la zona media inferior la Toba pumítica (TM tp), y en la inferior las Brechas y derrames andesíticos (TM bv-an).*

La unidad Ignimbrítica, cuando se encuentra sana, es de color rosa intenso y cuando está intemperizada presenta tonos de rosa claro, amarillento y blanco (fotos 3.2.22 y 3.2.23); está compuesta con cristales aislados de cuarzo con fiammes de pómez y vidrio. Presenta fracturas verticales, con espaciamiento entre 0.60 y 2.00 m.

Superficialmente también presentan un cambio de coloración por intemperismo, considerándose el macizo rocoso ligeramente meteorizado; de resistencia moderadamente duras a dura, que requiere de varios golpes del martillo para fracturarse, con velocidades sísmicas que varían de 620 m/s alteradas y descomprimidas, a más de 1200 m/s en estado sano.



*Foto 3.2.22 Detalle de la ignimbrita alterada y fracturada en el borde de la Loma se Santa María arriba y a lado del arroyo Chiquitón.*



*Foto 3.2.23 Detalle de la ignimbrita alterada y fracturada al lado de la Loma se Santa María arriba y también al lado del arroyo Chiquitón.*

En los estudios petrográficos se encontró que se trata de una ignimbrita compuesta de fenocristales de plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico, anfíbol, y piroxenos, en una matriz formada por escasas espículas de vidrio parcialmente desvitrificadas y fragmentos de cuarzos y feldespatos (fotos 3.2.24 y 3.2.25).



*Foto 3.2.24 Muestra de mano de Ignimbrita sana del escarpe de la Loma Larga.*

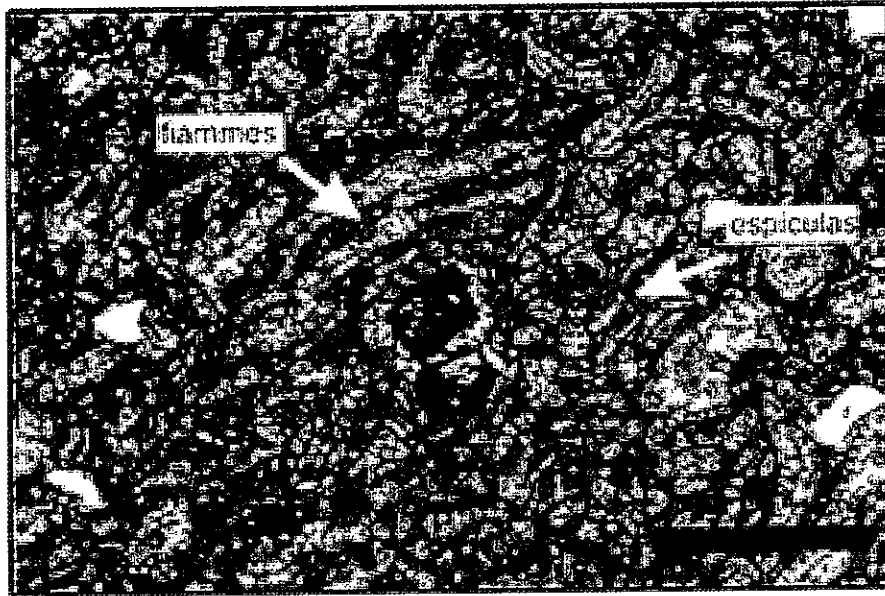


Foto 3.2.25 Nícoles cruzados, 5x, de una muestra de ignimbrita con espiculas de vidrio, fiammes, y piroxeno reemplazado por iddingsita (centro de la foto).

Esta unidad presenta un relieve con escarpes pronunciados en donde se pueden identificar dos familias de fracturas casi verticales y cuyas direcciones preferenciales son: F1: 45° a 75°, F2: 290° a 300° y un sistema secundario F3: 330° a 340°, tal como como se puede observar en la roseta de la figura 3.2.4.

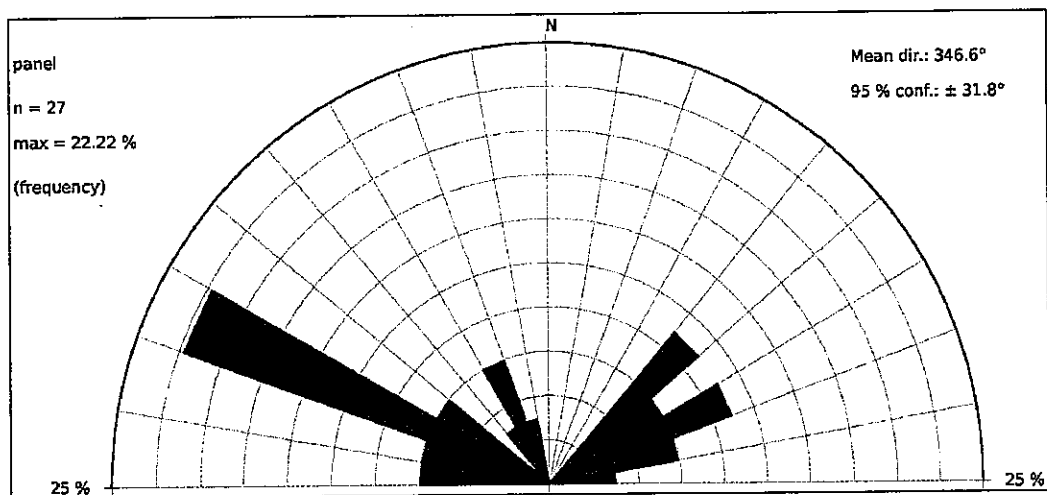


Figura 3.2.4 Roseta de rumbos de los datos de fracturamiento para la unidad ignimbritica.

La ignimbrita presenta un fracturamiento con un espaciado moderadamente junto a separado, como se puede observar en la fotos 3.2.22, 3.2.23 y 3.2.26, con superficies rugosas ligeramente alteradas, algunas se encuentran abiertas y en algunos casos rellenas de arcillas como se ve en la foto 3.2.27.



Foto 3.2.26 Ignimbrita compacta y fracturada en donde se aprecian los tres sistemas de fracturamiento.



Foto 3.2.27 Detalle del fracturamiento en la Ignimbrita compacta con relleno de arcilla.

- **Depósitos fluviales (Q df)**

Los depósitos fluviales (Q df) se presentan sobre el cauce del río Chiquito y arroyos principales, cubriendo de forma irregular y discordante a las rocas volcánicas y con espesores máximos de 2 m; están constituidos de arenas y gravas sueltas sin consolidar, las rocas tiene una composición andesítica, ignimbrítica y tobácea.

- **Depósitos lacustres (Q l)**

Los sedimentos depósitos lacustres (Q l) se han formado por la acumulación de materiales en un ambiente lacustre, por lo que predominan los sedimentos finos y en menor proporción gravas y arenas; pueden alcanzar espesores hasta de 50m en la parte central de la cuenca de Morelia y se encuentran cubriendo a las rocas de la secuencia riolítica; en la zona de estudio afloran en la parte norte al pie del escarpe de La Paloma.

- **Depósitos de talud (Q t)**

A lo largo del río Chiquito, en la ladera de la falla La Paloma y al pie de las pendientes más fuertes, se puede encontrar material de talud (Q t) producto del intemperismo de las rocas volcánicas; constituidos por lo general por bloques de roca y gravas, en estado suelto a poco compacto. En este trabajo únicamente se cartografiaron los depósitos que se encuentran al pie del escarpe de la falla La Paloma.

- **Depósitos aluviales (Q a)**

En su salida del cañón de Los Filtros Viejos el río Chiquito ha desarrollado un abanico aluvial (Q al) que se extiende a ambos lados del cauce del río; formado por detritos clásticos granulares que se ha generado por la súbita pérdida de competencia debido a la expansión del flujo y disminución del gradiente, que emergen desde la zona montañoso a la planicie. El club de golf y el desarrollo urbano lo cubren (foto 3.2.28).

- **Depósitos coluviales de deslizamiento de secuencia riolítica (Q dr).**

En la zona del portal de salida del Túnel I existe un antiguo deslizamiento de la ladera, de gran tamaño, denominado "Deslizamiento en la zona del Túnel I", donde los materiales del cerro se desplazaron hacia el oriente hasta llegar al río Chiquito, dejando una forma convexa en la parte alta de la ladera y una acumulación de materiales hacia la parte baja.

El material que conforma el depósito coluvial son fragmentos de diversos tamaños de tobas pumíticas, conglomerados e ignimbritas empacados en una matriz areno-limosa, de baja a moderada consistencia.



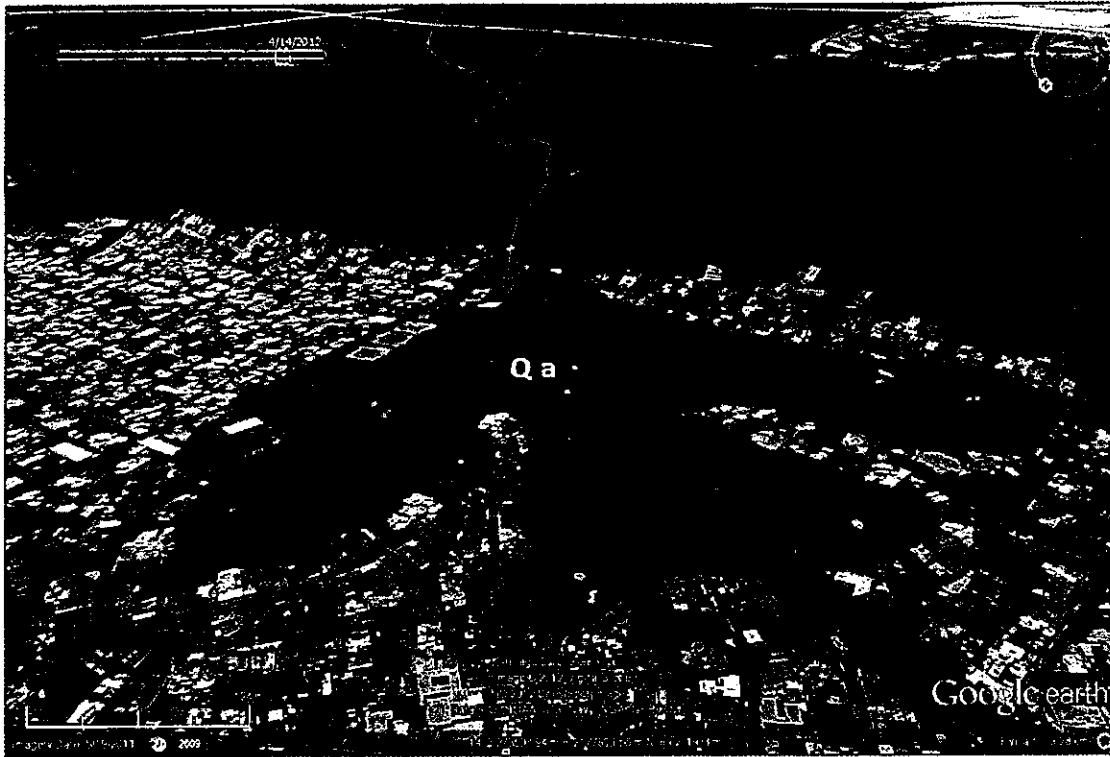


Foto 3.2.28 Abanico aluvial (Q a) formado por el Río Chiquito, al salir del cañón.

- **Depósitos coluviales de deslizamientos de secuencia andesítica (Q da).**

Otros deslizamientos, de mayor importancia, se han generado a lo largo de la ladera del escarpe de la Falla La Paloma. En la zona estudio, al oriente del Río Chiquito se identificaron cuatro deslizamientos, tal como se puede observar en el mapa geológico (Plano 3.3, deslizamientos Ocolusen I, II, III y IV), con tamaño de bloques y volúmenes desplazados diferentes; que se encuentran en las proximidades del proyecto vial del Ramal Camelinas.

Los materiales están constituidos de fragmentos angulosos de muy diversos tamaños empacados en material más pequeño arenoso limoso que proceden de la secuencia andesítica (TM bv-an).

Los deslizamientos ocurridos tanto en la secuencia andesítica como en la ignimbrita se describirán con mayor detalle en un apartado específico más adelante.

### 3.2.2 Fallas y fracturas

Las fallas geológicas más importantes que existen en la ciudad de Morelia se presentan en el plano de la figura 3.1.4; las cuales forman parte del sistema de fallas que cortan la parte central del Cinturón Volcánico Transmexicano, Morelia-Acambay de dirección ENE-WSW. Estas fallas tienen rasgos lineales superficiales o en el subsuelo que dan lugar a varios desniveles, que forman escalones de la secuencia riolítica con saltos del terreno, incluso algunas cubiertas por sedimentos lacustres como las mostradas en la figura 3.1.6 que forman el límite sur del medio graben de Cuitzeo (figura 3.1.3 y 3.1.5).

La Falla La Paloma y las fallas Altozano y Seminario, ambas identificadas en este trabajo, se ubican dentro de la zona de estudio donde pasará el Ramal Camelina y forman parte de este sistema regional de fallas, las cuales posiblemente empezaron su actividad en el Plioceno temprano con movimientos laterales izquierdos a transtensivos, para luego volverse progresivamente más extensionales (Ferrari et al., 1990; Suter et al., 1995b) y con inclinación al NW.

Durante el análisis fotogeológico y de imágenes satelitales se prestó especial interés en los lineamientos y rasgos geomorfológicos para determinar el tipo de estructuras, los estilos de deformación y los sistemas de esfuerzos que las originaron, donde se pudieron identificar una falla normal de primer orden (Falla La Paloma) y dos de segundo orden (Falla Altozano y Falla Seminario, respectivamente), así como un conjunto de sistemas de fracturas que afectan a todas las unidades estratigráficas volcánicas, las cuales en varios sitios se presentan abiertas en un rango desde 1 a 20 centímetros, sobre todo en las zonas relajadas.

Durante el levantamiento de campo se tomaron datos estructurales que permitieron conocer la orientación de fallas y fracturas; quedando registrado el azimut y el echado de las discontinuidades. Se trató durante el trabajo de campo buscar indicadores cinemáticos como estrías y *escalones* de falla que pudieran indicar la dirección de movimiento y sentido de las dislocamiento de las unidades.

Con base en el trabajo de campo se identificó que los sistemas de fracturas en las diferentes unidades presentan algunas diferencias, posiblemente asociado al tipo de roca, enfriamiento, espesor y posición estratigráfica. Las unidades en las que se identificó el fracturamiento más desarrollado fue en las brechas volcánicas y coladas andesitas (TM bv-an), seguida de las la ignimbríta (TM ig) y posteriormente por las tobas pumíticas (TM tp).

Una de las estructuras que se puso mucha atención fue a la supuesta falla del Río Chiquito (Arreygue-Rocha, 2002 y Garduño-Monroy, 2009); durante la fotogeología y los recorridos de campo no se observó esta falla. Se trató de buscar un lineamiento, saltos y deslizamientos de las unidades litológicas a lo largo del río para identificar esta estructura, pero no fue posible detectar claramente su existencia en este estudio.

En su lugar, se observó un lineamiento que se asoció más bien a una fractura regional, ya que a lo largo de este lineamiento no se aprecian saltos o desplazamientos de unidades litológicas que demuestran la existencia de una falla en el Río Chiquito. En la cartografía realizada se marco este lineamiento como una fractura, que presenta una extensión de 5.7 km y un rumbo acimutal de  $300^\circ$  y no va exactamente por el cauce del río (Plano 3.1).

A continuación se presentan las características principales de las fallas observadas:

- **Falla La Paloma**

Esta estructura ha sido descrita en diferentes trabajos (Garduño-Monroy, et. al., 2001; Arreygue-Rocha, et. al., 2002; Pola-Villaseñor, et. al., 2006; Garduño-Monroy, et. al. 2009).

La falla se ubica al sur de la ciudad de Morelia, corresponde a una falla normal con una dirección promedio de  $N 85^\circ E$  y de  $N 66^\circ E$  en la cercanía de la zona de estudio, en donde el bloque del alto cae hacia al NW con un echado de  $75^\circ$  y la traza de falla tiene una longitud aproximada de  $\pm 10$  km. En la zona de estudio, por el crecimiento de la zona urbana está cubierta en su mayor parte por construcciones y materiales aluviales, de talud o de deslizamientos, y solo en algunos sitios fue posible observarla directamente. La ubicación de la falla se muestra en los mapas geológicos (Planos 3.1 y 3.3) y en la vista panorámica de la foto 3.2.29.

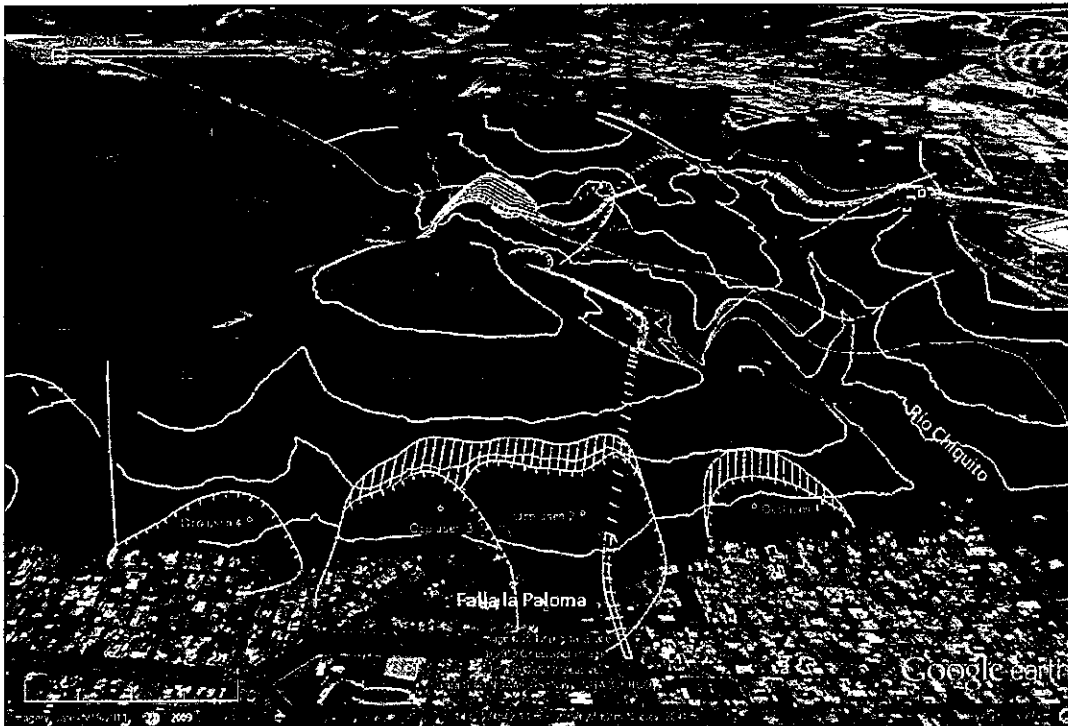


Foto 3.2.29 Vista panorámica de la zona de estudio, donde se aprecia en primer plano la Falla La Paloma y los diferentes deslizamientos de Ocolusen

Como resultado del movimiento de la falla, el alto estructural forma la Loma de Santa María y Loma Larga, mientras que en el bloque del techo, bajo y forma la planicie topografía donde se ha asentado la Ciudad de Morelia (Foto 3.2.29). La zona de falla ha formado un eskarpe más sobresaliente al oriente, disminuyendo la altura hacia el poniente; con un desnivel del eskarpe del orden de 200 m, provocado por el desplazamiento normal de la falla (Garduño Monroy, 2001).

La ladera de la falla, a pesar de la inclinación tan pronunciada, tiene un desarrollo habitacional importante, sobre todo hacia el sector oeste (zona del Bosque de Camelinas, La Loma y Bugambilias), donde aflora la secuencia pumítica y las ignimbritas. En contraste, hacia el este, donde afloran brechas volcánicas y derrames andesíticos presenta un eskarpe de mayor inclinación, lo que ha limitado el crecimiento habitacional, el cual se observa solo al pie o sobre zonas deslizadas (foto 3.2.29).

La superficie de la falla se observó al poniente del portal de salida del Túnel II, con una actitud de NE72°SW y una inclinación de 75° NW, con superficies pulidas, sobre la que se marcaron estrías de falla con cabeceo de casi de 90°, que indican el mecanismo determinante de tipo normal y escalones de falla (fotos 3.2.30 y 3.2.31 A y B).



*Foto 3.2.30 Vista de la superficie de la Falla La Paloma al oriente del portal de salida del Túnel II, donde se identificaron estrías sobre el plano de falla.*



A



B

*Fotos 3.2.31 A y B Falla La Paloma, se aprecia las superficie pulida con las estriás con cabeceo de 90°, los fragmentos de roca están cortados por el plano de falla.*

El material del bloque de piso que se observó se compone de brechas volcánicas conformadas por fragmentos de rocas andesíticas de textura porfídica, de color gris, que intemperizan en tonos rojizos, con cristales de plagioclasas y olivino en una matriz vítrea. Los fragmentos son angulosos y varían en tamaño desde 2 cm hasta 3 m de diámetro, aunque predominan los menores a 10 cm de diámetro. Se estima que la zona de falla pueda tener cuando menos unos 15 m de espesor.

A lo largo de la ladera de la Falla La Paloma se han observado varios deslizamientos (foto 3.2.29), los cuales según los criterios en zonas inestables, dependen de factores condicionantes como pueden ser los geométricos (altura e inclinación del talud), geológicos (que condicionan a través de la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud ó zona de falla), hidrogeológicos (con presencia de agua) y geotécnicos relacionados con el comportamiento mecánico del terreno (resistencia y deformabilidad). Además de factores desencadenantes o activos, externos que originan la rotura una vez que se cumplen una serie de condiciones, como pueden ser sobrecargas estáticas, cargas dinámicas, cambios en las condiciones hidrogeológicas, factores climáticos, variaciones en la geometría y reducción de parámetros resistentes (González de Vallejo, 2000).

Todos estos factores pudieron estar presentes en los deslizamientos de la ladera de La Paloma actuando unos más severamente que otros. Aun cuando algunas publicaciones consideran que los sismos de la propia falla habrían provocado estos deslizamientos, hay otros indicios que indican que por sí solo se pueden asociar a los deslizamientos, como la propia pendiente y altura del escarpe de la falla que con un echado de 65° a 75° hacia la cara libre del talud y un desnivel de unas decenas de metros respectivamente, junto con sistemas de fracturas paralelas y diagonales al escarpe y capas u horizontes de las secuencia volcánica andesítica (TM bv-an) débiles, alteradas, de baja resistencia y la presencia de una lluvia intensa, pudieran formar cuñas o superficies inestables.

Además, los estudios de geofísica en la zona del Túnel II han manifestado franjas ó sectores de relajación por encima de la zona del deslizamiento (Ocolusen II), relacionados con bajos valores de velocidades sísmicas (figura 3.2.5), donde también se han visto fracturas de tensión escalonadas (Plano 3.2) (foto 3.2.32) o la presencia de fracturas abiertas en la corona del deslizamiento (Ocolusen III, foto 3.2.33), o todavía aun, como las observadas en el deslizamiento Cumbres de Las Américas (fotos 3.2.34. y 3.2.35) que son testigo de una relajación del macizo rocoso, de deslizamientos previo y cortes posteriores efectuados para un camino de acceso. Es también muy probable, que el sustento o algún horizonte débil de la unidad de brechas y tobas andesíticas de la secuencia inferior (TM bv-an), como las observadas en el deslizamiento Cumbres de Las Américas sea las causas principales de los deslizamientos en la ladera de La Paloma (foto 3.2.36).

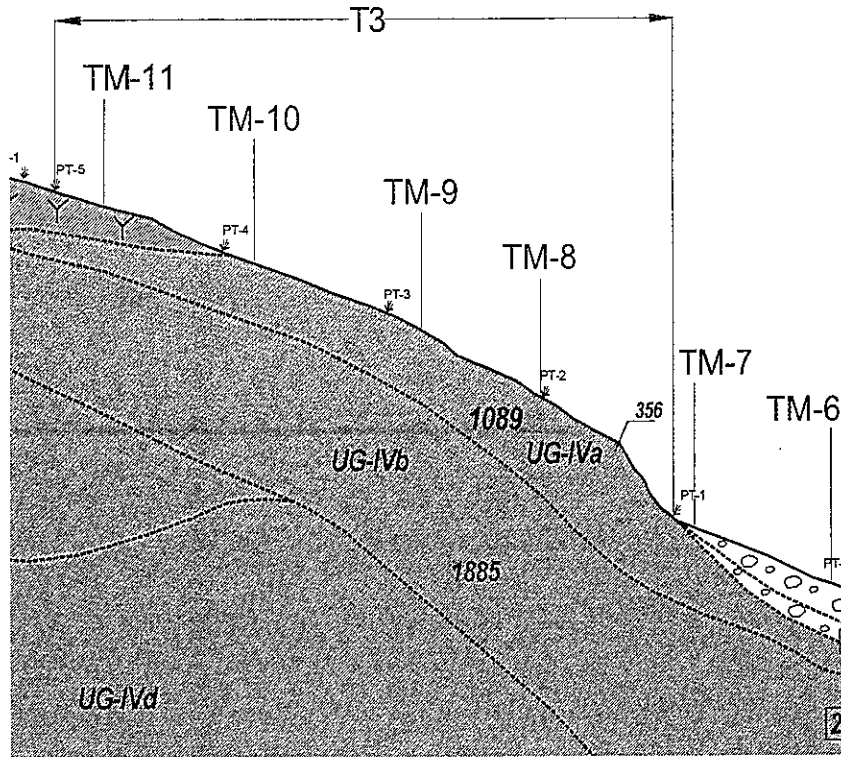


Figura 3.2.5 Sección donde se marca la zona de relajación a partir de la interpretación geofísica.

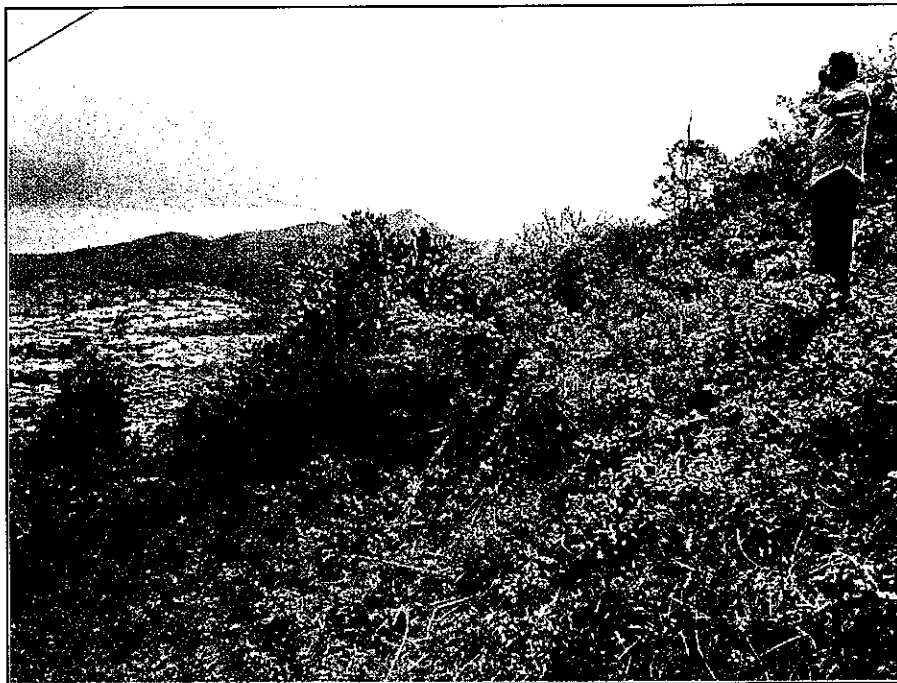


Foto 3.2.32 Fracturas de tensión escalonadas en la porción alta de la ladera de La Paloma entre los deslizamientos Ocolusen I y II, a lo largo de las torres de alta tensión.



*Foto 3.2.33 Fracturas de tensión sobre el respaldo del lado derecho del escarpe principal del deslizamiento de Ocolusen III.*



*Foto 3.2.34 Familias de fracturas abiertas de echado alto en la zona de deslizamiento Cumbres de las Américas.*





*Foto 3.2.35 Zona de fracturas escalonadas, abierto con inclinaciones de 70° y separación de 3 a 1m en la zona del deslizamiento Cumbres de las Américas*



*Foto 3.2.36 Toba cizallada en la zona del contacto entre la secuencia de brechas y tobas claras abajo y brechas, tobas y coladas andesíticas (TM bv-an) arriba.*

De acuerdo a los trabajos publicados, las fallas E-W del Sistema de Fallas Morelia-Acambay se suponen aparecieron hace 7 a 9 millones de años, durante el Mioceno; no obstante, con base en la cartografía, geología estructural y paleo sismología (Garduño et al, 2009) sugieren que las estructuras en la región de Morelia-Cuitzeo han estado activas durante el Holoceno, controlando los terremotos históricos (Urquiza 1872; Ramírez y Reyes 1873; Flores, 1920; Astiz- Delgado, 1980; Suter, et al., 1992; Suter, et al., 1996; Suter, et al., 1996; y Garduño et al, 2009).

Por lo tanto, la Falla La Paloma se puede considerar como activa; Garduño-Monroy et al, 2009 considera que algunos segmentos del sistema Morelia -Acambay se han reactivado y en el caso de la Falla La Paloma dos veces, después 1.6 ma, con desplazamientos de 80 cm.

Sin embargo, al momento no hay registros sísmicos contundentes, solo trabajos de mediciones realizadas debajo de los depósitos de talud; donde se cita que un suelo se desplazó 50 cm por una falla normal, y otro donde se excavó una trinchera con suelos de un metro cubiertos por depósitos de talud y desplazados también  $\pm 0.50$  m por una falla normal (Garduño-Monroy et al, 2001); ambos sitios asociados con la Falla La Paloma.

Según los datos de los sismos registrados recientemente, no hay ningún evento que se alinea con la Falla La Paloma (ver Tabla 3.1.1 y figura 3.1.7), pero desde luego el tiempo de registro es muy corto. En la bibliografía consultada se reporta, según Garduño, 2001, que la falla es activa y sin que el autor lo asegure categóricamente con algún tipo de microsismicidad o mediciones telemétricas.

#### • **Falla Altozano**

La Falla Altozano se detectó en la zona del Túnel I, tiene una longitud observada de 3.3 km, con una actitud N 54°E; 70° NW y un salto de aproximado de 17 m, por lo que se considera una falla sensiblemente paralela al sistema la falla La Paloma (Planos 3.1, 3.2 y 5.1)

Esta falla cruzara el Túnel I por su parte central, desplazando a las ignimbritas (TM ig), a los conglomerados (TM cg) y a las tobas pumíficas (TM tp); sin embargo, se observa en las imágenes que este lineamiento prosigue en dirección al Este, cruzando el Río Chiquito y afectando también a las brechas y derrames andesíticos (fotos 3.2.38 y 3.2.39).

En los recorridos de campo no fue posible observar directamente esta falla debido a la capa de suelo que la cubre; sin embargo con el apoyo de los ocho sondeos exploratorios realizados a lo largo del eje del túnel I (SM-1, SM-2, SM-3, S1, S2, S3, S4 y S5) y del estudio geoelectrico, se interpretó un salto de las ignimbritas en el bloque del techo y/o la falta de continuidad de los conglomerados al mismo nivel en las perforaciones de ese lado; por lo tanto, por la distribución de las rocas y la inclinación del plano de falla, se considera como un falla de tipo normal, semejantes a las de la mayoría de la región.

En las fotos 3.2.37 y 3.2.38 se observan los desniveles morfológicos justo donde cruza la Falla de Altozano, y más a la derecha en la Falla Seminario; estas dos fallas son casi paralelas y tiene el echado para el mismo lado y con la misma inclinación.

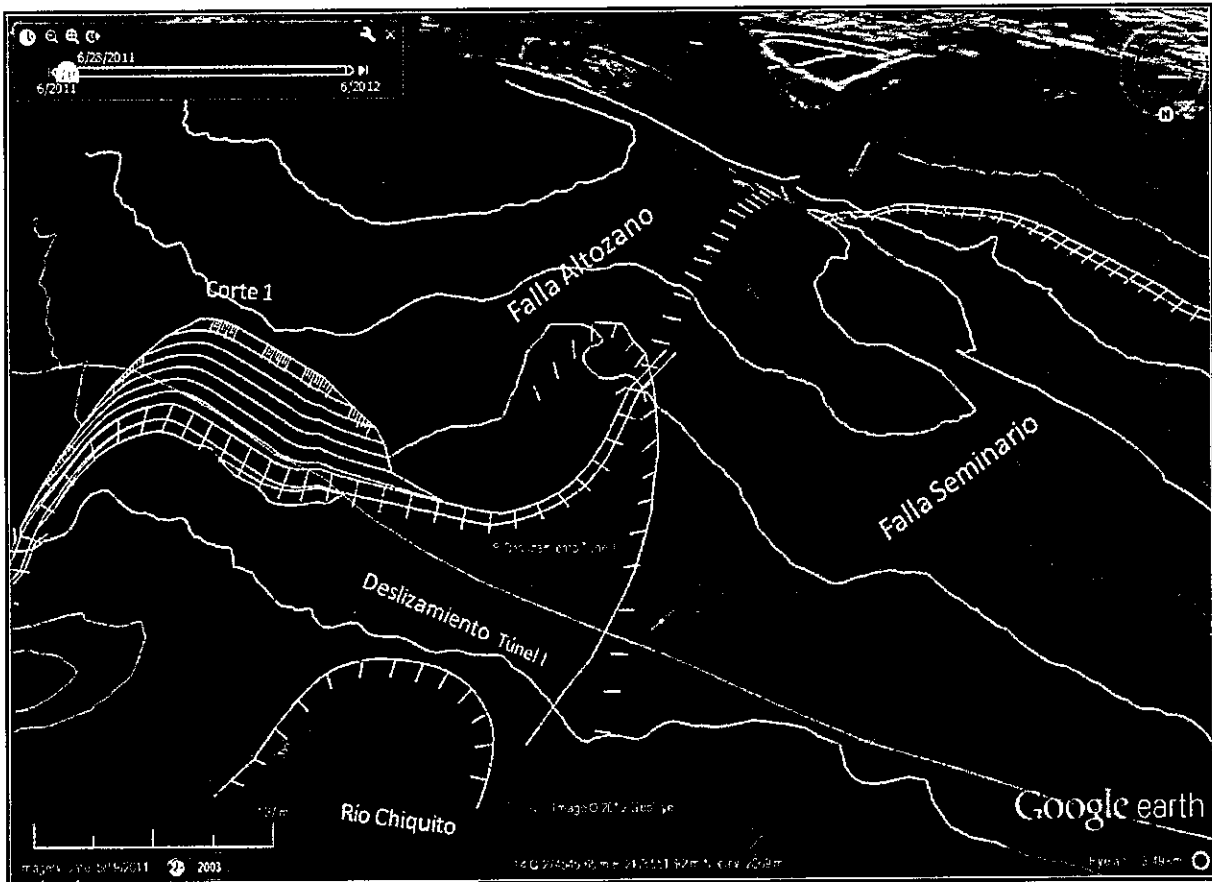


Foto 3.2.37 Vista de la fallas (en rojo) de Altozano a la izquierda y Seminario a la derecha. Ambas falla tienen una actitud semejante, casi paralelas.



*Foto 3.2.38 Vista panorámica de la zona de estudio donde se aprecia la extensión de la Falla Altozano que tiende a juntarse con la Falla de la Paloma al E del área de estudio.*

- **Falla Seminario**

En la zona de estudio, próximo al proyecto en el cadenamiento 0+560, inicia un arroyo rectilíneo en donde se pudo identificar claramente la presencia de una falla con rumbo N 50° E y echado de 70° hacia el NW, que se extiende hacia el Río Chiquito (foto 2.3.39); tiene una longitud aproximada de 1,200 m y una zona de afectación de aproximadamente 0.70 m, donde se observa una brecha de falla y superficies pulidas (fotos 3.2.40 y 3.2.41)

Con base en la morfología del sitio, el sistema de fallas de la región y la inclinación de la falla, se infiere como de tipo normal, posiblemente con un desplazamiento lateral izquierda.

En el tramo donde se tuvo la oportunidad de observar a la falla, corta a la secuencia de tobas pumíticas, conglomerados e ignimbritas. La falla en las tobas pumíticas se define como un tramo rectilíneo de varios metros sobre el arroyo (foto 2.3.43).

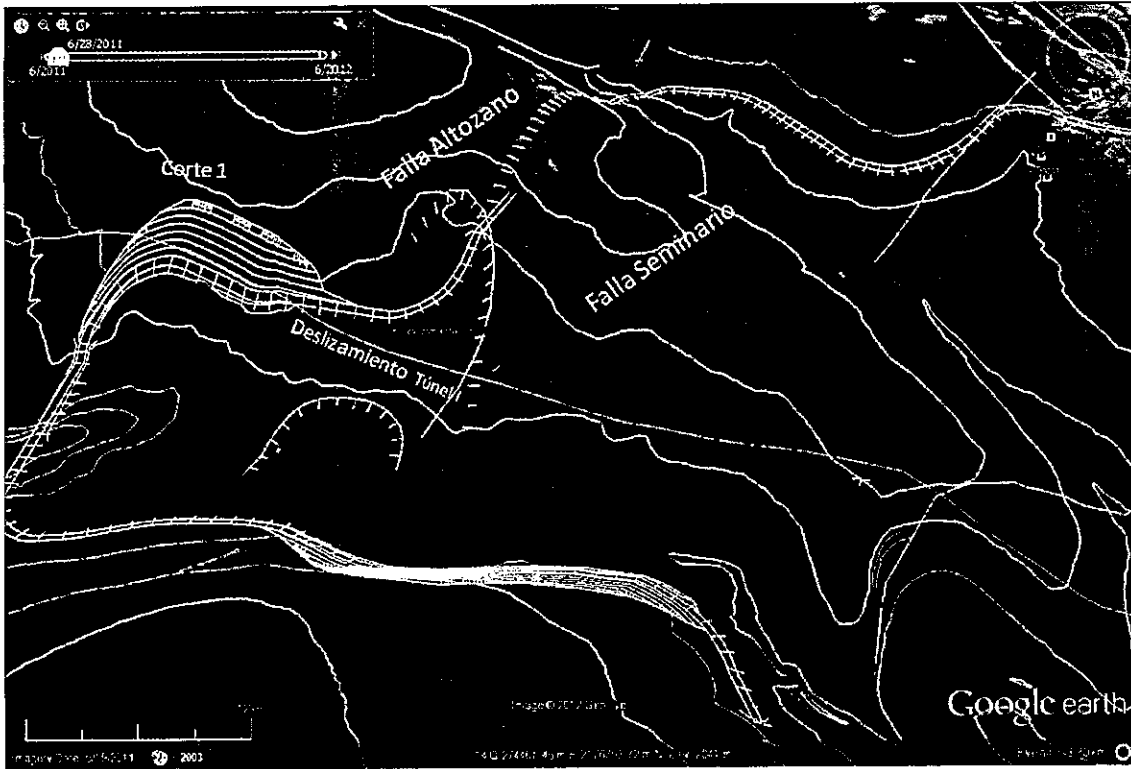


Foto 2.3.39 Vista hacia el SW donde se aprecia las fallas Altozano y Seminario.



Foto 3.2.40 La Falla Seminario presenta una zona de falla de unos 0.70 cm sobre el lecho del arroyo dentro del unidad Ignimbrítica (TM ig)



Foto 3.2.41 Superficie pulida de la Falla Seminario, sobre el arroyo donde se aprecian los escalones de falla formada sobre la laminación en las ignimbritas



Foto 2.2.42 Plano de la Falla Seminario sobre el lecho del arroyo que desarrolla en las tobas pumíticas

### 3.2.3 Deslizamientos de ladera

En el área de este estudio se presentan tres zonas donde se han presentado deslizamientos importantes de laderas:

- La primera zona se ubica al sur del área de estudio, en el cerro ubicado en la margen izquierda del río Chiquito, y específicamente en la zona de la salida del túnel I.
- La segunda zona se presenta en la ladera de la falla La Paloma y que corresponden a la zona de salida del túnel II, los cuales han sido denominados como deslizamientos Ocolusen I, II, III y IV.
- Por último, la zona del camino de acceso al fraccionamiento Cumbres de las Américas, ubicada al oriente de las Ocolusen a lo largo de ladera La Paloma, que aunque se encuentra alejada de la zona de obras viales en estudio, es importante considerarla para analizar los deslizamientos de la región.

En el mapa geológico de la zona de deslizamientos (Plano 3.3) se ilustran claramente la ubicación, dimensiones y morfología de cada uno de los cuatro deslizamientos de Ocolusen.

Los deslizamientos de Ocolusen y Cumbres de las Américas han sido estudiados por investigadores de la Universidad de San Nicolás y también se han realizado diversas tesis profesionales por estudiantes de esa institución.

En la carta geológica del escarpe de La Paloma, publicada por Arreygue Rocha et al, en 2002, se menciona la presencia de los deslizamientos de la zona de Ocolusen (figura 3.2.6) y los mecanismos de falla que la provocaron.

También Garduño et. al, en su estudio de las fallas de la ciudad de Morelia publicado en el 2002, menciona la existencia de los deslizamientos de Ocolusen, en donde incluye una fotografía del año 1960 donde se observa que los deslizamientos existían previamente a las edificaciones del desarrollo urbano, por lo que las construcciones realizadas en la zona de estudio no han sido iniciadores de los mecanismos de inestabilidad (foto 3.2.43). Como inclusive se señala, estos deslizamientos pueden ser precolombinos (Arreygue-Rocha, 2002).

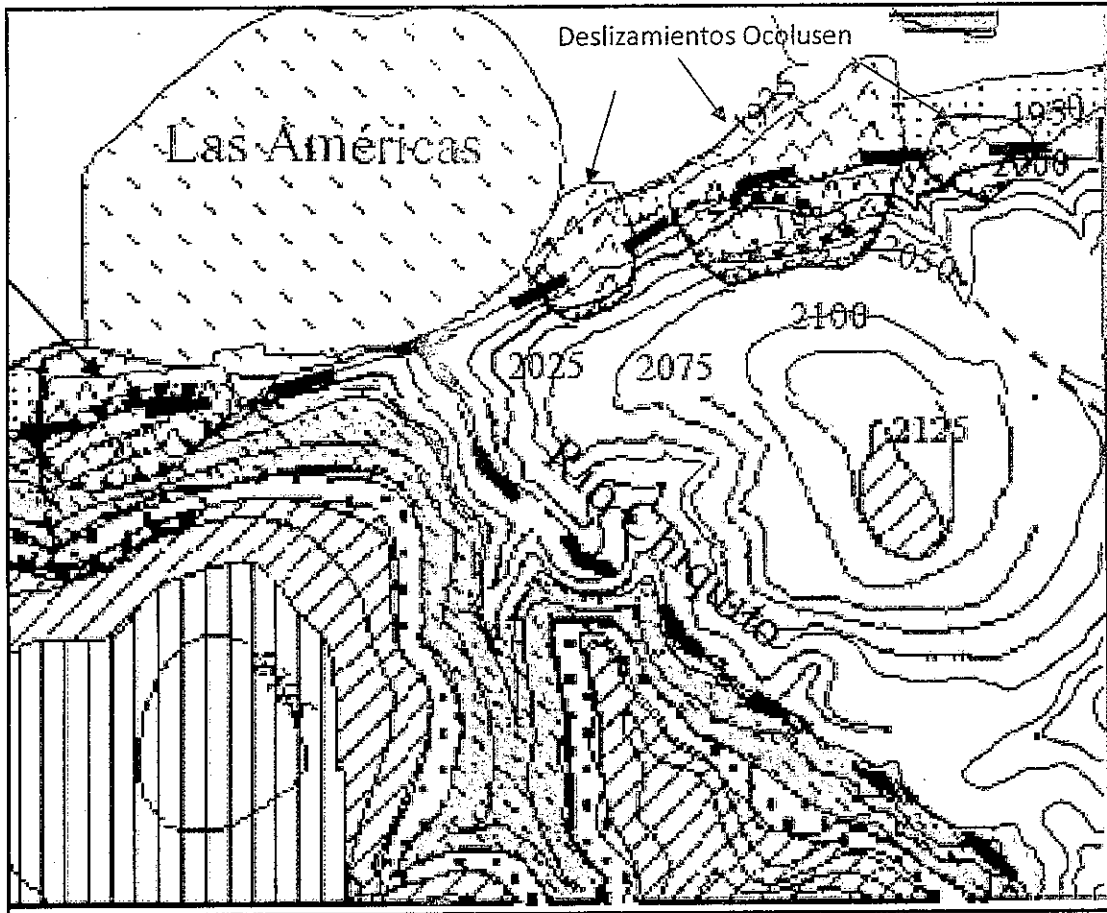
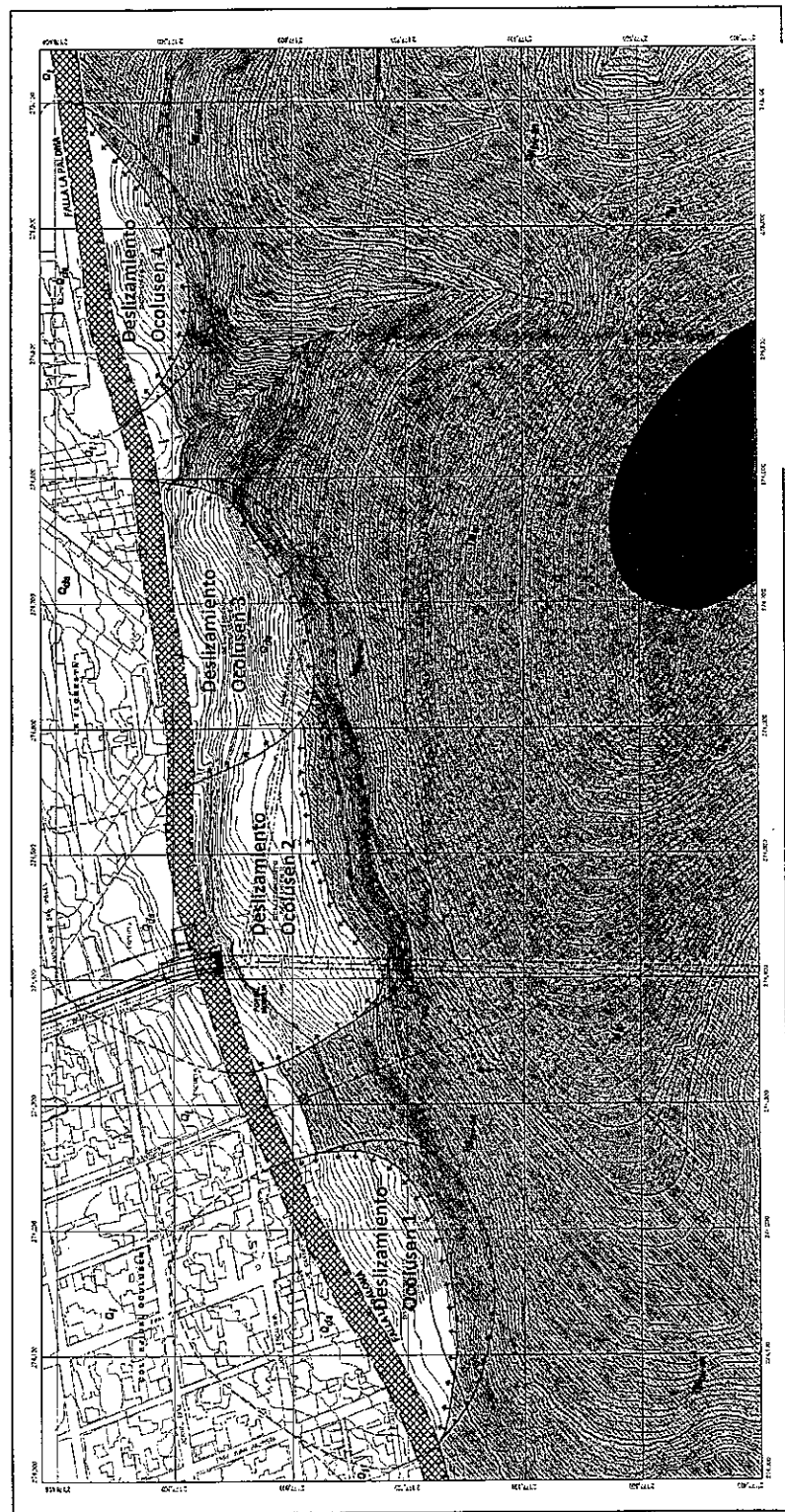


Figura 3.2.5 Deslizamiento de la zona de Ocolusen





Foto 3.2.43 Fotografía aérea de la Falla La Paloma en el año de 1960, donde todavía no se edifican las construcciones del desarrollo urbano del sur de la Cd. de Morelia; se aprecia así mismo que ya existían los deslizamientos de la ladera (Garduño-Monroy, et. al. 2001)



UNIDADES LITOLÓGICAS.

EDAD	FORMACIÓN GEOLOGICA	UNIDAD LITOLÓGICA	LITOLÓGIA
CUATERNARIO		Q <sub>ab</sub>	DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTOS OCOLUISEN
		Q <sub>l</sub>	DEPÓSITOS DE TALUD
		Q <sub>2</sub>	DEPÓSITOS LACUSTRES
MIOCENO	GEÓGENA	T <sub>ig</sub>	IGNIMBRITA
	GEÓGENA	T <sub>g</sub>	TOBAS PUMITICAS
	GEÓGENA	T <sub>g</sub> + T <sub>g</sub> + T <sub>g</sub>	BRECCIAS VOLCÁNICAS, TOBAS Y DERRAMES ANDÉSITICOS

SIMBOLOGIA GEOLOGICA.

- CONTACTO LITOLÓGICO
- CONTACTO LITOLÓGICO INTERIOR
- UNIDAD LITOLÓGICA
- FALLA NORMAL
- FALLA NORMAL INFERIDA
- ZONA DE FRACTURAS ABIERTAS.
- LÍMITE DE LA ZONA DESLIZADA
- ESCARPE PRINCIPAL DEL DESLIZAMIENTO.
- ESCARPE SECUNDARIO

Figura 3.2.6 Mapa geológico de la zona de deslizamientos de Ocoluisen

A continuación se presenta una breve descripción de las características morfológicas y geológicas de cada zona de deslizamiento:

**a) Deslizamiento en la zona del Portal de salida del Túnel I**

Este deslizamiento se localiza en las inmediaciones del Río Chiquito, en el flanco oriente de la Loma Larga, justo en el portal de salida del Túnel I y está limitado al SE por la Falla Altozano (figura 5.1.3) . El material deslizado se dirigió hacia el NE, tiene una forma triangular que llega hasta el río Chiquito, con una longitud máxima de 500 m (ver Plano 3.1 y fotos 3.2.39 y 44).

Se caracteriza por una morfología de abanico típico de las avalanchas de escombros de zonas inestables con alta pendiente. Presenta en la zona superior del deslizamiento una zona plana de dimensiones considerables (foto 3.2.45) y posteriormente más abajo un deslizamiento secundario dentro del material del deslizamiento original, ocasionado nuevamente tal vez, por la erosión de río Chiquito. El deslizamiento presenta un escarpe pronunciado de forma semicircular de unos 55 m de diámetro en promedio.

Este material aun se presenta en la zona donde se proyecta realizar las excavaciones del el portal de salida del Túnel I, con espesores entre 6 y 10 metros.

El deslizamiento afecto a toda la secuencia de rocas riolíticas de la ladera, tanto a las tobas pumíticas (TM tp), conglomerados (TM cg) e ignimbritas (TM ig), las cuales se desplazaron hacia el oriente, cubriendo a las rocas andesíticas (TM bv-an) y llegando hasta el cauce del río Chiquito.

El material deslizado está compuesto de fragmentos angulosos de muy diversos tamaños (de centímetros a bloques de más de 3 m) de ignimbritas de color gris claro, tobas pumíticas y conglomerados, que intemperizan a rosa claro y blanco en una matriz arenosa de la misma composición; materiales en conjunto poco consistentes y de baja resistencia.

Este deslizamiento se explica por varias causas: la fuerte pendiente del terreno, el fracturamiento vertical de las rocas riolíticas, pero principalmente por la presencia en la base del deslizamiento de las tobas pumíticas, que son materiales de baja resistencia cuando están alteradas, y la existencia de la Falla Altozano que sirvió de respaldo en la parte sur del deslizamiento, ya que las rocas a lo largo de la falla deben estar más fracturadas y alteradas.

Otro factor que pudo haber contribuido al deslizamiento, es el fracturamiento de las rocas riolíticas, ya que si los echados del sistema de fracturas F3, que afecta a las tres rocas riolíticas (TM bv-an, TM tp y Tm ig) se inclinan hacia el SE, entonces podrían formarse una cuñas de rocas con salida hacia el Río Chiquito, como justamente ocurre en ese sitio y favorecen la inestabilidad de la pared norte de la falla

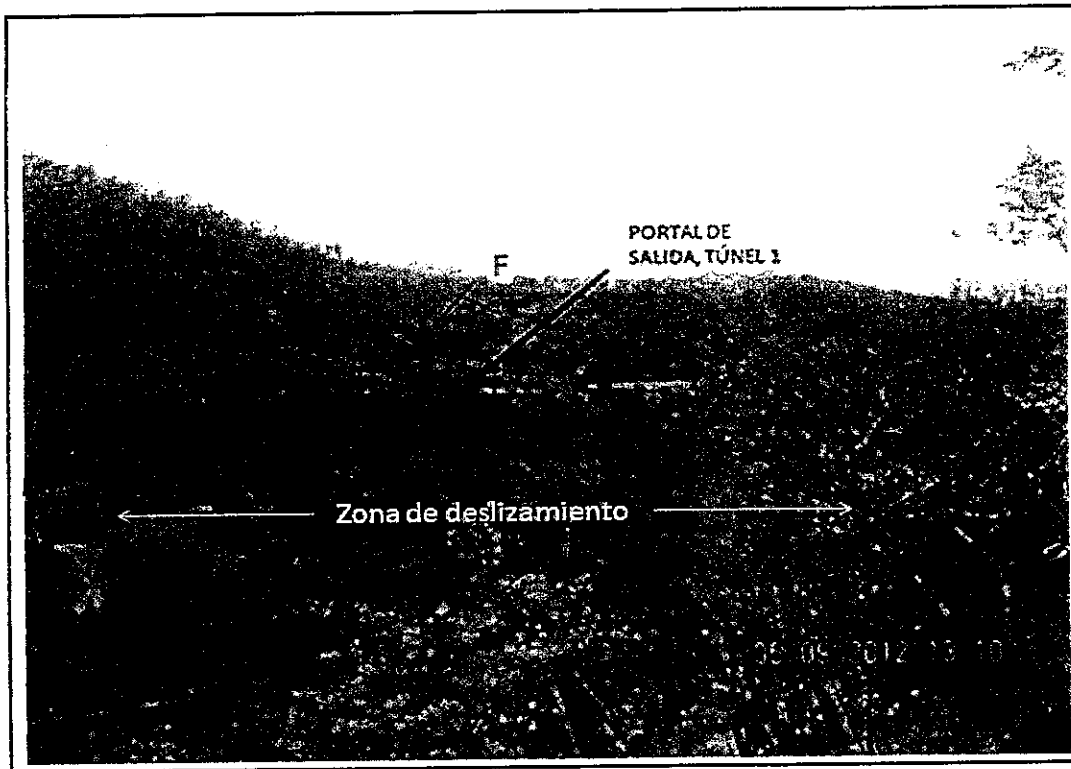


Foto 3.2.44 Panorámica del deslizamiento en la zona del Túnel I, donde se plantea el portal de salida.

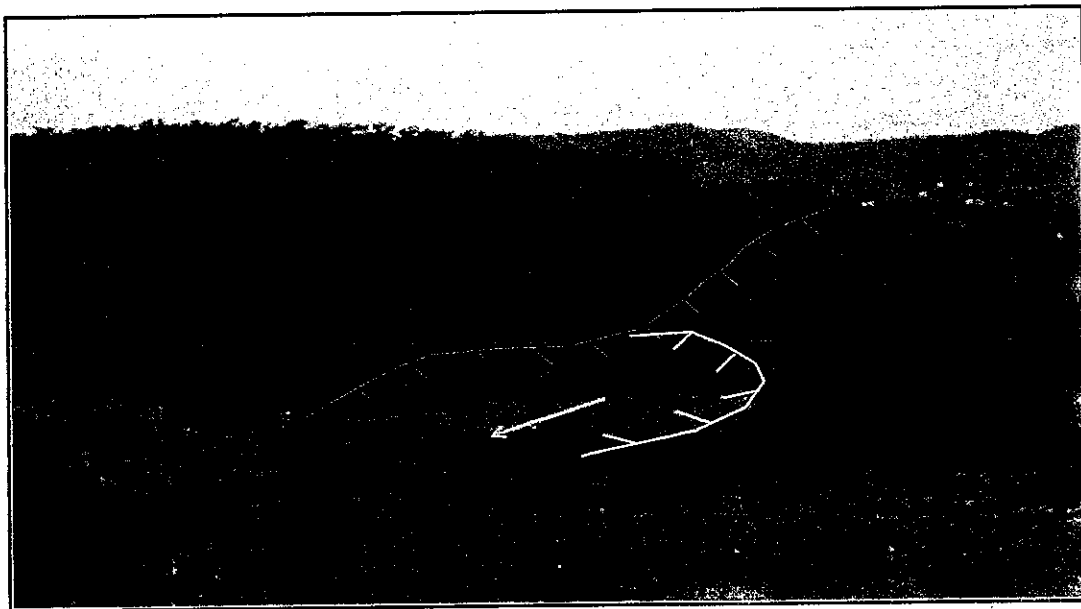


Foto 3.2.45 Panorámica del deslizamiento de la zona del Túnel I, donde se aprecia la gran planicie formada por este deslizamiento y la traza de la falla que sirvió de respaldo.

## **b) Deslizamiento a lo largo del cantil de la Falla La Paloma (Deslizamientos Ocolusen)**

En la ladera de la Falla La Paloma, al este del Río Chiquito, existen varios deslizamientos de la ladera, la mayoría de ellos han sido ampliamente estudiados por diversos autores y motivo de tesis profesionales, y han sido denominados como deslizamientos Ocolusen, dado que se encuentran ubicados arriba de la colonia Ocolusen.

En este trabajo se identificaron cuatro zonas de deslizamiento, por lo que se denominaron Ocolusen I, II, III y IV; de estos, el que se estudio con mayor detalle fue el deslizamiento Ocolusen II, ya que en esta zona es donde se ubica el portal de salida del túnel II.

A continuación se presenta una breve descripción de las características morfológicas y geológicas de cada uno de los deslizamientos:

### **• Deslizamiento Ocolusen I**

Este deslizamiento se ubica sobre la ladera de la Falla La Paloma y es el primero al poniente del río Chiquito; está limitado al oeste por un macizo rocoso o "troquel" de roca in situ de 100 m de ancho, con el deslizamiento Ocolusen II.

El material deslizado tiene una dimensión de 260 m en su parte más ancha y una longitud aproximada, desde su corona hasta la zona de acumulación en la parte central, de unos 370 m. En el Plano 3.3 y figura 3.2.6 se puede observar la distribución y geometría que corresponde con un circo causado por un deslizamiento de escombros.

El material que compone este deslizamiento corresponde con fragmentos angulosos de brechas volcánicas y andesitas en una matriz de materiales más finos de la misma composición. Este deslizamiento afecto únicamente a rocas de la unidad TM bv-an.

### **• Deslizamiento Ocolusen II (Zona portal de salida del Túnel II)**

Este deslizamiento es el que tiene mayor relevancia para el proyecto vial; ya que el portal de salida del Túnel II se excavaría en estos materiales. Sus dimensiones y distribución se puede observar en el Plano 3.3, figura 3.2.6 y en la foto 3.2.46.

El Deslizamiento II se desarrolla sobre la ladera de Falla La Paloma, está limitado al oriente por el deslizamiento Ocolusen III (que es posterior y cubrió a parte de este); al poniente se presenta el macizo in situ y después el deslizamiento 1. Tiene una longitud casi constante de 235 m hasta la zona urbana. El escarpe principal tiene una inclinación fuerte, en la parte central se presenta una meseta plana hasta un segundo escarpe secundario y continua hacia el norte con una morfología suave. De todos los deslizamientos de esta zona es el de mayor extensión, y el que implicó mayor volumen desplazado; en la parte baja, muchas de las construcciones cercanas se desplantaron sobre los materiales de acumulación de este deslizamiento (foto 3.2.48).

Al igual que el deslizamiento anterior, y en general todos los de esta zona, solo se ven afectadas rocas de la unidad TM bv-an. Se trata de un conjunto de materiales heterogéneos, conformados por fragmentos de rocas andesíticas y brechas volcánicas, de forma angulosa, en tamaños que varían de gravas a bloques mayores a 2 m , empacados en una matriz arcillosa, originados por la avalancha de escombros (foto 3.2.47).

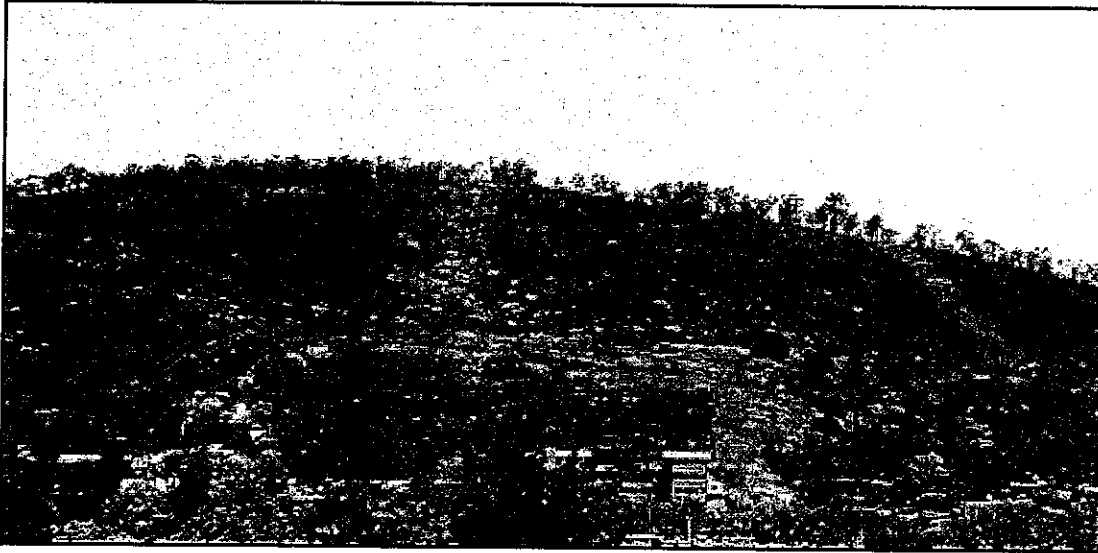


Foto 3.2.46 Panorámica del deslizamiento Ocolusen II, en portal de salida del Túnel II.

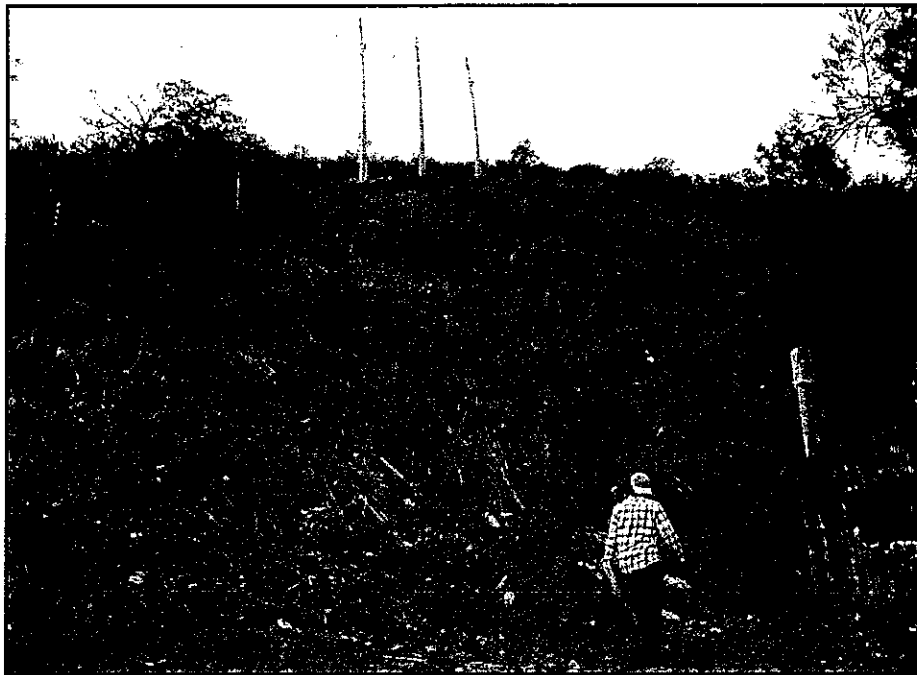


Foto 3.2.47 Características de los materiales de la zona del deslizamiento Ocolusen II.

Para determinar las características y espesor del material de acumulación de este deslizamiento se han realizado una serie de exploraciones geofísicas consistentes en tendidos de sísmica de refracción y sondeos transitorios electromagnéticos (TEM), a lo largo y ancho del deslizamiento.

En el eje del túnel entre el escarpe principal y el escarpe secundario (tendido T2) se determinó un espesor máximo que varía entre los 25 m, al igual que en la zona del portal de salida del túnel proyectado (tendido T1), es en estos tendidos donde se reporta el mayor espesor de estos depósitos, ya que en los tendidos paralelos al escarpe (11, 12 y 13) rondan en los 20 m de espesor. Estos materiales presentan valores de velocidades de propagación de onda entre los 200 a los 1,797 m/s, siendo los más comunes entre 600 y 900 m/s, lo que indica que son materiales poco consolidados.

Subyaciendo a estos materiales se encuentra la unidad de brechas, tobas y derrames andesíticos (TM bv-an), esto antes de la Falla La Paloma, ya que después la cubren los depósitos lacustres (Q I).



*Foto 3.2.48 Escarpe secundario en el deslizamiento Ocolusen II.*

Sobre los mismo materiales coluviales se han desarrollado un conjunto de fracturas de tensión paralelas al escarpe, producto del reacomodo y asentamiento diferencial de los materiales deslizados no compactados, la pendiente, la infiltración de agua en temporada de lluvias, peso de las construcciones y la circulación vial, que afectan localmente al pavimento y algunas bardas (foto 3.2.49). Sin embargo, la deformación es menor a medida que disminuye el espesor del material de acumulación producto del deslizamiento.

La deformación y dirección de material acumulado fue en dirección norte. Las deformaciones y asentamientos diferenciales continúan, cuando menos superficialmente, como se puede observar en los postes de alta tensión doblados y el tensado de las líneas eléctricas que se ubican en la zona de acumulación del deslizamiento (Foto 3.2.50).



Foto 3.2.49 Afectación de la barda cementada sobre los escombros del deslizamiento.



Foto 3.2.50 Postes de alta tensión deformados en zona de acumulación del deslizamiento

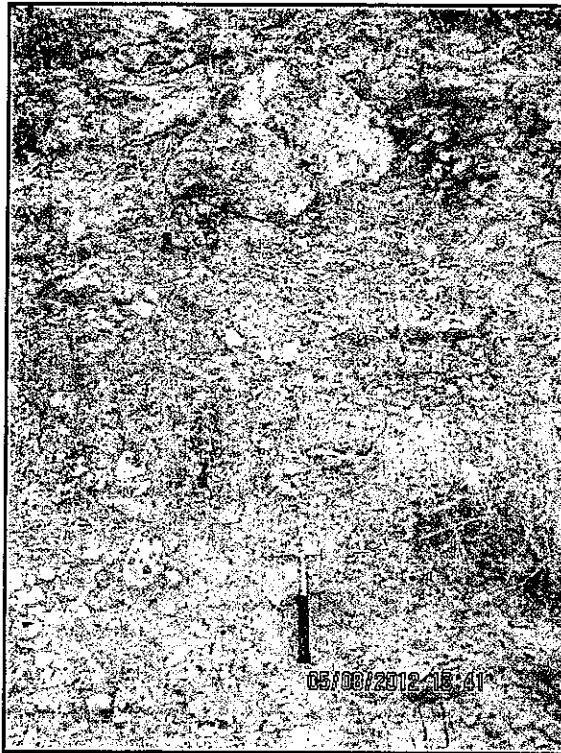


- **Deslizamiento Ocolusen III**

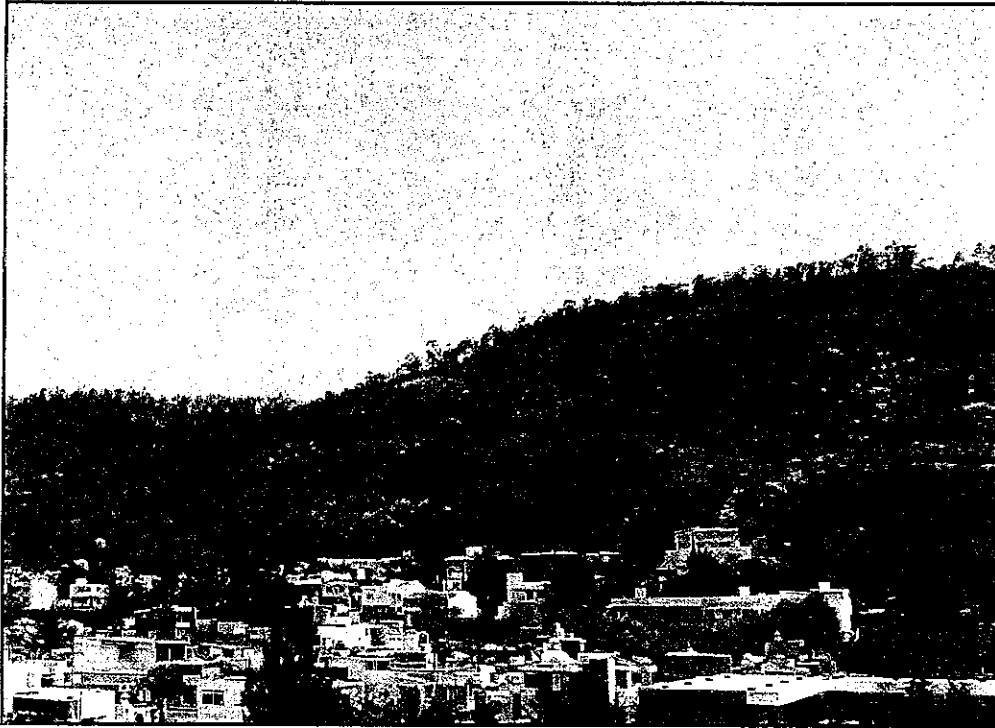
El deslizamiento se localiza al oriente del deslizamiento Ocolusen II, se considera que este es mas reciente que el Ocolusen II, ya que lo corta y deposita material encima del segundo. No obstante, las coronas, escarpes principales y cabezas de ambos están casi a la misma elevación, morfológicamente el deslizamiento tiene una forma de abanico (foto 3.2.52).

Se desarrolla sobre la ladera de la falla La Paloma, con un ancho de 220 m y una longitud del escarpe principal a la zona de acumulación de 250 m en su parte central, en los flancos izquierdo y derecho se observan cantiles casi perpendiculares, donde se aprecian claramente algunas fracturas abiertas, que tienen la misma dirección del escarpe principal (foto 3.2.53).

Los materiales deslizados involucran fragmentos angulares de andesita y brecha volcánica de muy diversos tamaños, siendo los más grandes de hasta 1.5 m empacados en una matriz arenosa (foto 3.2.51).



*Foto 3.2.51 Detalle de los materiales que componen el deslizamiento Ocolusen III.*



*Foto 3.2.52 Panorámica de la zona del deslizamiento Ocolusen III.*



*Foto 3.2.53 Fracturas abiertas en el escarpe principal del deslizamiento Ocolusen III.*

- **Deslizamiento Ocolusen IV**

Es el deslizamiento de menores dimensiones de esta zona que se presenta también a lo largo de la ladera de la falla La Paloma, es más elongado que los anteriores (fotos 3.2.29) y, presenta el eje mayor en la dirección de la Falla La Paloma, teniendo un largo en esa dirección de aproximadamente 255 m y un pequeño escarpe de 20 metros de longitud, con una pendiente menor a la de los deslizamientos anteriores. Las rocas afectadas por este deslizamiento también corresponden a las rocas andesíticas de la unidad TM bv-an.

- **Deslizamiento Cumbres de las Américas**

Por último, el deslizamiento de las Cumbres de las Américas, se localiza al este de la zona de estudio, fuera de la zona del portal de salida del Túnel II. En este sitio no se analizó propiamente las características del deslizamiento, sino que se estudió más bien el tipo de roca que se presenta en este lugar, el cual no se había observado en las zonas estudiadas en este trabajo.

En esta zona se presenta la unidad inferior de la secuencia andesítica TM bv-an, la cual no aflora en los demás sitios estudiados, por lo que es importante el conocimiento de sus características litológicas.

Esta unidad está formada de una brecha de color claro, de fragmentos de 5 a 20 cm de diámetro empacados en una matriz arenosa, de mediana a pobremente cementada y que termina en un toba de grano fino en contacto con las brechas volcánicas andesíticas oscuras.

Esta unidad inferior por su estratificación y baja consolidación son poco resistentes y pueden representar superficies de debilidad, propensas a deslizamientos, sobretodo en sus horizontes más finos (fotos. 3.2.54 y 3.2.36).



*Foto 3.2.54 Vista del deslizamiento Cumbres de las Américas, donde se aprecia el contacto entre las brechas de color gris claro en la parte inferior y en la superior las característica brechas y derrames andesíticos.*

#### 4. GEOFISICA

Se realizó una investigación del subsuelo con métodos geofísicos indirectos que permitieron auxiliar en la determinación de las características físicas y distribución en el subsuelo de los materiales.

Los objetivos prácticos de los estudios geofísicos fueron diferentes según la zona de las obras viales:

a) *Zona del deslizamiento en el portal de salida del Túnel II*

- Definir la distribución, espesor y condiciones de los materiales en el cuerpo principal del deslizamiento.
- Determinar la geometría del cuerpo deslizado y la profundidad a la que se puede encontrar la roca in situ.
- Definir las condiciones de los materiales bajo el deslizamiento.
- Definir las condiciones de fracturamiento y alteración de las rocas en la zona de la corona del deslizamiento.

b) *Zonas de los túneles*

- Auxiliar a determinar la calidad del macizo rocoso a lo largo de los túneles.
- Determinar la zona de mayor alteración y fracturamiento en los portales de los túneles.
- Definir la calidad y espesor del material del deslizamiento en el portal de salida del Túnel I.

c) *Zona de cortes*

- Determinar las condiciones de calidad de las rocas en la zona donde se efectuaran los cortes de mayor altura.

d) *Viaducto*

- Determinar las condiciones de calidad en la zona de apoyos del viaducto

Para poder cumplir con los objetivos planteados, se realizó un estudio geofísico aplicando dos métodos geofísicos complementarios: el sísmico de refracción y el eléctrico de resistividad.

## 4.1 ESTUDIO SÍSMICO

El estudio sísmico se llevo a cabo por medio del Método Sísmico de Refracción, que consiste en determinar las velocidades de ondas elásticas que se propagan en el subsuelo y con base en ellas auxiliar a determinar la distribución y condiciones de los materiales en el subsuelo.

En este estudio se presenta una breve descripción de los fundamentos del método sísmico, la metodología de los trabajos de campo y del procesamiento de la información, concluyendo con la presentación de los resultados del estudio.

El estudio sísmico se ejecutó mediante la técnica de Tendidos de Refracción Sísmica, que se basa en la teoría de "tiempo mínimo" que siguen las ondas elásticas al propagarse desde un lugar en la superficie (punto de tiro PT), generado por un impulso, en este caso el golpe de un marro contra una placa metálica, hasta alcanzar horizontes del subsuelo de mayor velocidad de transmisión, y desde éstos regresar hasta la superficie del terreno y ser detectados por los geófonos colocados y alineados con el punto de tiro, tal como se ilustra en la Figura 4.1.1

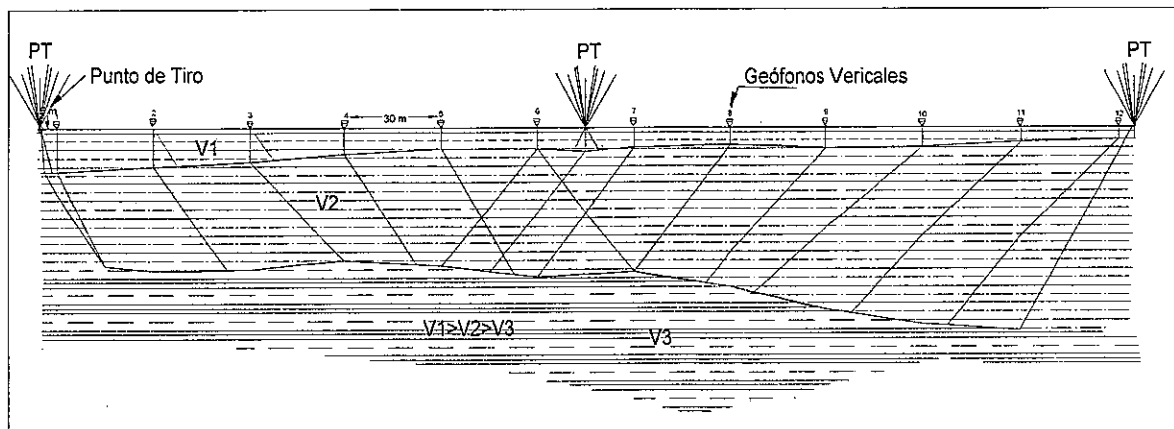


Figura 4.1.1 Dispositivo sísmico del Tendido Sísmico de Refracción (TS)

### 4.1.1 Trabajos de campo

Se presenta una breve descripción de los trabajos de campo realizados, mencionando el dispositivo sísmico, la distribución de los tendidos y el equipo utilizado.

#### a) Descripción del dispositivo de campo

El trabajo de campo consistió en realizar una serie de Tendidos Sísmicos de Refracción (TS), distribuidos de forma estratégica en las diversas zonas de estudio.

Los Tendidos Sísmicos de Refracción tuvieron una longitud de 60 m y 120 m, en función de la profundidad y grado de detalle requerido para cada obra.

Los Tendidos de 60 m de longitud se realizaron básicamente en la zona de los cortes 1 y 2 y en el viaducto, de manera de obtener información de más detalle hasta una profundidad de 25 m; para lo cual se colocaron 12 geofónos o puntos de detección sísmica, separados a cada 5 m sobre la horizontal; realizándose tres puntos de tiro por tendido, ubicando uno al centro y dos en ambos extremos.

Los Tendidos de 120 m de longitud se efectuaron en la zona de los portales ambos túneles y en el área del deslizamiento "Ocolusen II", en donde era importante profundizar hasta 50 m; para lo cual se colocaron 12 geofónos separados a cada 10 m sobre la horizontal y se realizaron cinco puntos de tiro por tendido, ubicando uno al centro, dos a los lados a 30 m del central y dos en los extremos del tendido.

En ambos casos, la generación de las ondas sísmicas se realizó por medio de golpes de marro sobre una placa metálica colocada sobre el terreno natural.

En el Anexo 4.1 se incluye una memoria fotográfica que ilustra el equipo utilizado y las condiciones en las que se realizaron los trabajos de campo del estudio geosísmico.

#### *b) Distribución de los tendidos sísmicos*

La distribución de los tendidos sísmicos se realizó de manera de cubrir las zonas de mayor importancia para los objetivos de este estudio; por lo que se concentraron en las siguientes obras del camino:

- Portal de salida túnel I
- Corte 1
- Viaducto Rio Chiquito
- Corte 2
- Portal de entrada túnel II
- Portal de salida del túnel II
- Deslizamiento Ocolusen

En la Tabla 4.1.1 se presentan la ubicación de los Tendidos Sísmicos en las diferentes aéreas de estudio; mientras que en la figura 4.1.2 se muestra la ubicación de las zonas de estudio y la localización general de los tendidos sísmicos; y en el Plano 4.1 se muestra con mayor detalle la distribución general de los sondeos en cada una de las zonas de estudio.

Tabla 4.1.1 Distribución de Tendidos Sísmicos

Zona de estudio	No. de Tendido Sísmico
Portal de salida Túnel II y deslizamiento Ocolusen	TS-1
	TS-2
	TS-3
	TS-4
	TS-5
	TS-6
	TS-7
	TS-8
	TS-9
	TS-10
	TS-11
	TS-12
	TS-13
	TS-14
Portal de entrada del túnel II	TS-15
	TS-16
Corte 2	TS-17
	TS-18
	TS-19
	TS-20
	TS-21
	TS-22
	TS-23
Viaducto Rio Chiquito	TS-24
Corte 1	TS-25
	TS-26
	TS-27
	TS-28
Portal de salida del Túnel 1	TS-29





*Figura 4.1.2 Ubicación de las zonas del estudio sísmico*

*c) Equipo sísmico utilizado*

El equipo geofísico que se utilizó en el estudio sísmico fue el siguiente:

- Sismógrafo marca Seistronix de 12 canales, modelo RAS-24
- Computadora Laptop con el programa de control del sismógrafo y captura de datos.
- 12 geófonos verticales de onda "P", de 28 Hz.
- Cable sísmico con 12 salidas a cada 5 m para conectar los geófonos.
- Cable sísmico con 12 salidas a cada 10 m para conectar los geófonos.
- Sistema de detección de disparo inalámbrico.
- Marro y placa metálica.

#### **4.1.2 Procesamiento sísmico**

El procesamiento de la información se llevó a cabo con la metodología y programas especializados de interpretación sísmica que a continuación se presentan:

- a) El primer paso del procesado tuvo como objetivo el determinar, con los sismogramas obtenidos en campo, los valores de velocidad de onda "Vp" de cada Tendido Sísmico; para lo cual se siguieron varias etapas y se utilizaron diversos programas, que se describen brevemente a continuación:

##### Programa IXSeq2SeqY

Programa para transformar el formato de los registros sísmicos y filtrar los sismogramas de cada tendido cuando presentan ruidos inconvenientes que enmascaran parte de la información (Figura 4.1.3).

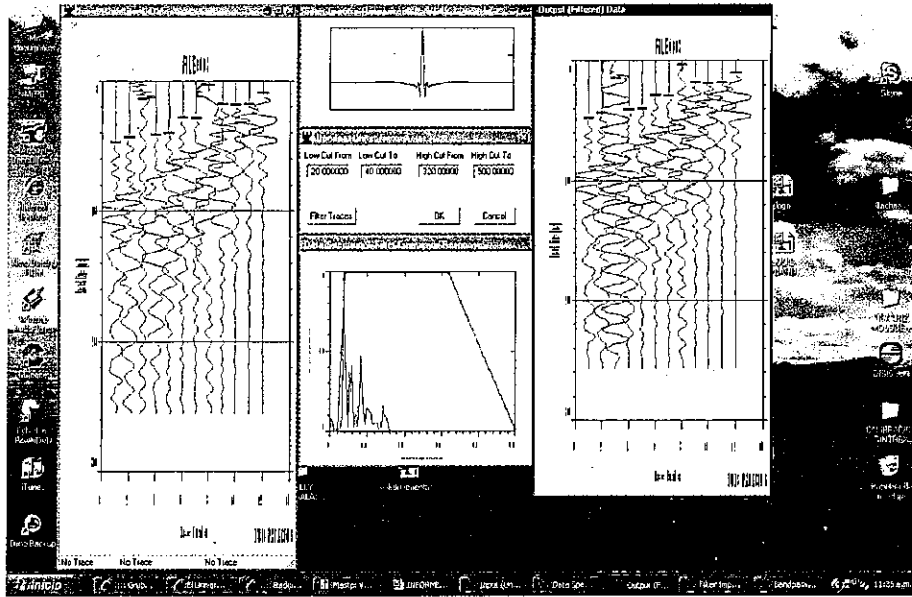


Figura 4.1.3 Vista de la secuencia de filtrado de sismogramas

Programa PICKWIN95

Programa para obtener tiempos de arribo de cada sismograma generado en campo (Anexo 4.2), así como modificar la amplitud de estos (Figura 4.1.4).

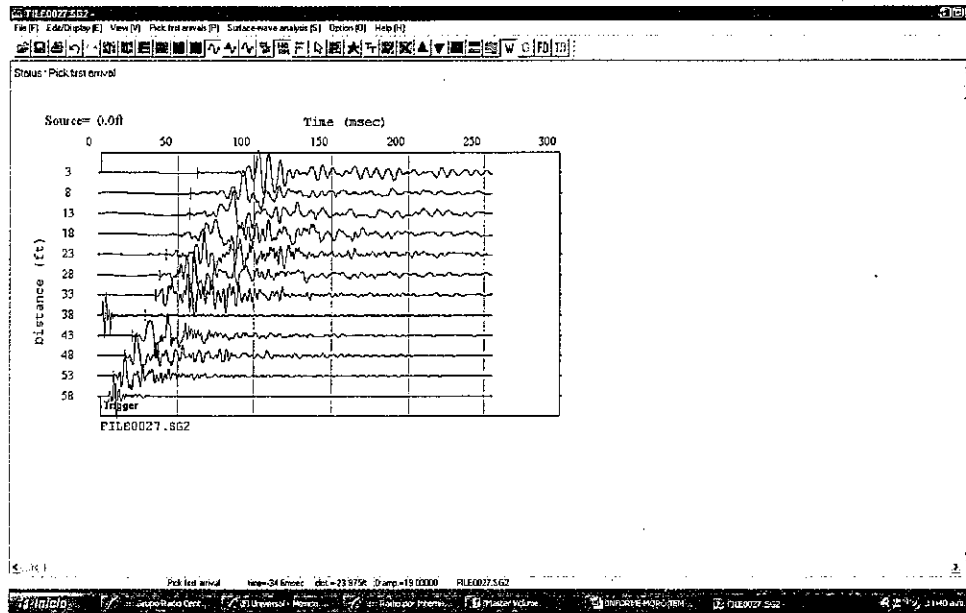


Figura 4.1.4 Vista de obtención de tiempos de arribo de ondas "P"

Programa PLOTREFA

Programa en ambiente Windows que permite generar las dromocrónicas o gráficas tiempo-distancia (Figura 4.1.5), y posteriormente procesar la información mediante varias técnicas para obtener un modelo estratificado con espesores y velocidades en dos dimensiones y para generar modelos tomográficos (Figura 4.1.6).

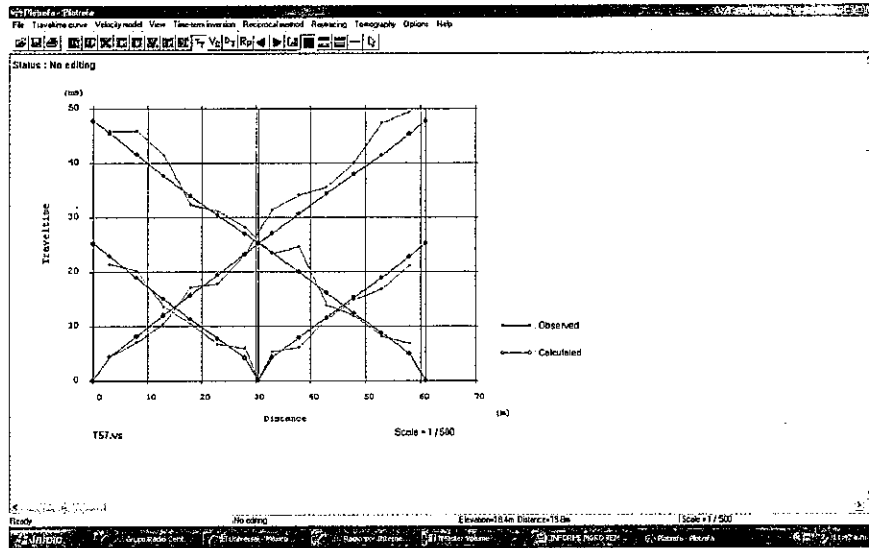


Figura 4.1.5 Dromocrónica mostrando modelo de campo y procesado

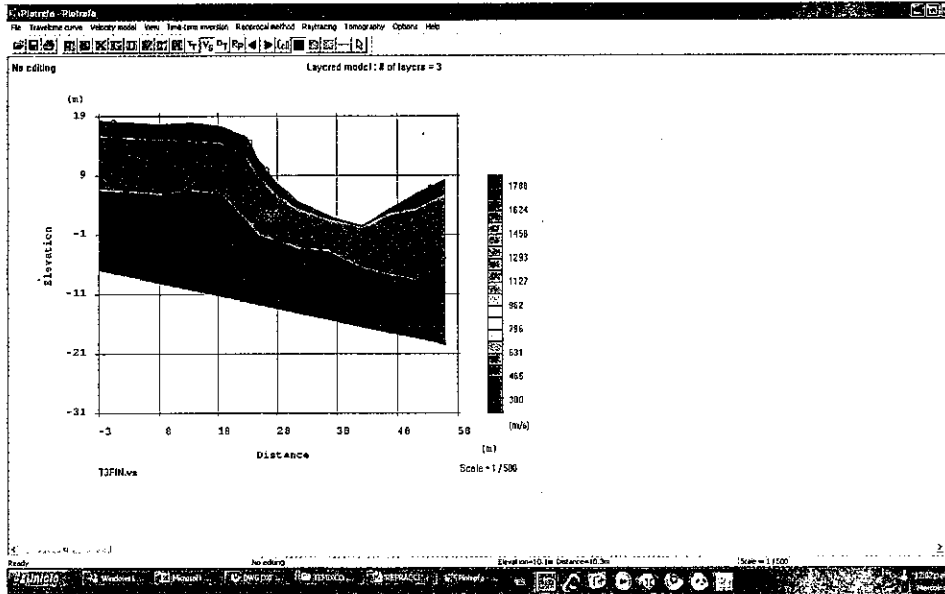


Figura 4.1.6 Modelo obtenido del procesado con topografía

- b) Una vez obtenidas las velocidades, se procedió a incorporar, sobre un perfil topográfico, los diferentes valores de velocidad "Vp" bajo cada Tendido, y uniendo la información de los Tendidos realizado sobre una misma línea de investigación, elaborando de esta manera cada uno de los Perfiles Sísmicos.
- c) Posteriormente, estos perfiles fueron interpretados de manera de efectuar una zonificación sísmica del terreno, basada únicamente en los valores de velocidad.
- d) El siguiente paso consistió en realizar una integración de la zonificación sísmica con la información del modelo geológico del sitio, con lo cual se definieron una serie de Unidades Geosísmicas y se establecieron las características litológicas de cada unidad.
- e) Finalmente, se elaboró el informe técnico que describe la metodología de campo, procesamiento e interpretación de datos y los resultados obtenidos para cada zona de estudio.

#### 4.1.3 Resultados

Con base en los valores de velocidad de onda longitudinal obtenidos de los diversos tendidos efectuados en cada zona de estudio, se procedió a efectuar una zonificación de los materiales, definiendo de esta manera diversas unidades geosísmicas (US).

Esta zonificación sísmica se apoyo también en los levantamientos geológicos superficiales, así como en los sondeos directos que fue posible obtener en algunas obras (viaducto y túneles).

Cada unidad geosísmica se asoció a un tipo de material y a sus condiciones de intemperismo, consistencia y fracturamiento.

En cada zona de estudio se elaboraron diversas secciones geosísmicas, que muestran los valores de velocidad, las unidades geosísmicas, su distribución en el subsuelo y su probable correlación con el tipo de material. Los planos que se realizaron son los siguientes:

Plano 4.2 Secciones geosísmicas Corte 1 y Viaducto

Plano 4.3 Secciones geosísmicas Corte 2

Plano 4.4 Secciones geosísmicas portal de salida Túnel II

A continuación se presenta una descripción de los resultados obtenidos en cada en cada área de estudio; mencionando brevemente el marco geológico y las características de las unidades geosísmicas diferenciadas.

#### 4.1.3.1 Corte 1

En el corte 1 se llevaron a cabo cuatro tendidos sísmicos de 60 m de longitud, los cuales se ubicaron en secciones transversales en los sitios donde se efectuaran las excavaciones de mayor altura.

En este sitio se elaboraron cuatro secciones geosísmicas (T-24, T-25, T-26 y T-27), cuya ubicación y resultados se presentan en el plano 4.2.

El estudio geológico indica que en toda la zona del corte se presentan tobas pumíticas, cubierta por capas de conglomerados, ambos pertenecientes a la secuencia volcánica riolítica (TM tp). Además en el área del corte se ha planteado la presencia de la fractura regional Río Chiquito, que cruzaría de manera longitudinal la zona del corte.

#### *Unidades geosísmicas*

En este corte se determinó la presencia de tres Unidades Geosísmicas, con los rangos de velocidad y tipos de material asociados que se resumen en la Tabla 4.1.2.

*Tabla 4.1.2 Unidades geosísmicas – Corte 1*

Unidad Geosísmica	Velocidad longitudinal (m/s)	Condiciones del material
US-1	200-400	Suelo residual sin consistencia.
US-2a	400-560	Tobas fuertemente intemperizadas y poco consistentes.
US-2b	730-1100	Tobas medianamente intemperizadas y medianamente consistentes.

#### *Descripción de las unidades geosísmicas*

- *Unidad US-1*

Se presenta en la parte superficial del terreno, se caracteriza por presentar velocidades muy bajas, entre 200 y 400 m/s, que indican que se trata de un material blando y sin consistencia, que debe corresponder a un suelo residual arenoso; se distribuye en toda la zona del corte, con espesores de 0.5 a 2 m, sin embargo en la zona central del corte se alcanzaron espesores de hasta 4 m.

- *Unidad US-2a*

Se presenta por debajo de la unidad superficial, con velocidades bajas de 400 a 560 m/s, que se asocian a tobas arenosas fuertemente intemperizadas y poco consistentes; se distribuye en toda la zona del corte, con espesores que oscilan entre 2 y 5 m, sin embargo en la parte central su espesor aumenta entre 7 y 12 m. Esta unidad quedara ubicada en las partes altas del corte.

- *Unidad US-2b*

Es el estrato sísmico más profundo, con velocidades medias entre 730 y 1,100 m/s, asociadas a las tobas arenosas medianamente intemperizadas y medianamente consistentes; su espesor es mayor de 20 m. Esta unidad quedara ubicada en la parte media y baja de los cortes.

#### 4.1.3.2 Corte 2

En el corte 2 se llevaron a cabo seis tendidos sísmicos de 60 m de longitud, los cuales se ubicaron en secciones transversales en los sitios donde se efectuaran las excavaciones de mayor altura.

En este sitio se elaboraron seis secciones geosísmicas (T-18, T-19, T-20, T-21, T-22 y T-23), cuya ubicación y resultados se presentan en el plano 4.3.

El estudio geológico indica que en toda la zona del corte se presentan intercalaciones de brechas volcánicas y derrames andesíticos, de la secuencia volcánica andesítica.

#### *Unidades geosísmicas*

En este corte se determino la presencia de tres Unidades Geosísmicas, con los rangos de velocidad y tipos de material asociados que se resumen en la Tabla 4.1.3.

*Tabla 4.1.3 Unidades geosísmicas - Corte 2*

Unidad Geosísmica	Velocidad primaria (m/s)	Características de los materiales
US-1	300 - 400	Suelo residual y/o roca altamente intemperizada
US-2a	1000 - 1500	Andesita intemperizada, medianamente consistente y fracturada
US-2b	1700 - 2200	Andesita poco intemperizada, consistente y poco fracturada

### *Descripción de las unidades geosísmicas*

- *Unidad US-1*

Se presenta en la parte superficial del terreno y cubre la mayor parte del área del corte, se caracteriza por presentar velocidades muy bajas, entre 300 y 800 m/s, que indican que se trata de un suelo residual sin consistencia y/o roca altamente intemperizada, poco consistente y muy fracturada; con espesores de 0.5 a 2 m.

- *Unidad US-2a*

Se presenta por debajo de la unidad superficial y de manera poco continua, manifiesta velocidades medias de 1,000 a 1,500 m/s, que se asocian a las rocas andesíticas intemperizadas, consistentes y fracturadas; se presenta en algunas zonas del corte, principalmente hacia la parte final del tramo y con espesores delgados entre 1 y 4 m. Esta unidad quedara ubicada en las partes altas del corte.

- *Unidad US-2b*

Es el estrato sísmico de mayor presencia en toda la zona del corte, con velocidades medias entre 780 y 1,450 m/s, asociadas a las tobas arenosas medianamente intemperizadas y medianamente consistentes. Se presenta en toda la zona del corte con espesores mayores de 20 m. Esta unidad quedara ubicada en la parte media y baja de los cortes.

#### **4.1.3.3 Viaducto Rio Chiquito**

En el viaducto se realizo un tendido sísmico de 120 m de longitud, ubicado a lo largo del eje en la margen derecha, donde se colocaran las dos pilas y el estribo derecho de la subestructura del puente.

En este sitio se elaboró una sección geosísmica (T-24), cuya ubicación y resultados se presentan en el plano 4.2.

El estudio geológico indica que en toda la zona del corte se presentan intercalaciones de brechas volcánicas y derrames andesíticos, pertenecientes a la secuencia volcánica andesítica (TM bv-an).

#### *Unidades geosísmicas*

En este corte se determino la presencia de tres Unidades Geosísmicas, con los rangos de velocidad y tipos de material asociados que se resumen en la Tabla 4.1.4.



Tabla 4.1.4 Unidades geosísmicas – Viaducto río Chiquito

Unidad Geosísmica	Velocidad primaria (m/s)	Características de los materiales
US-1	444	Suelo residual sin consistencia
US-2a	1311	Andesita medianamente intemperizada y medianamente consistente y fracturada
US-2b	1852	Andesita poco intemperizada, consistente y poco fracturada

#### Descripción de las unidades geosísmicas

- *Unidad US-1*

Se presenta en la parte superficial del terreno y cubre la mayor parte de la ladera derecha, se caracteriza por presentar velocidades muy bajas, de 444 m/s, que indican que se trata de un suelo residual sin consistencia y/o roca altamente intemperizada, poco consistente y muy fracturada; con espesores de 0.5 a 2 m.

- *Unidad US-2a*

Se presenta por debajo de la unidad superficial y de manera continua, manifiesta velocidades medias de 1,300 m/s, que se asocian a las rocas andesíticas intemperizadas, medianamente consistentes y fracturadas; su espesor es variable, ya que en la parte baja cercana al cauce del río es de solo 1 a 2 m, pero en la parte media de la ladera varía entre 6 y 9 m, y hacia la zona alta aumenta a 12 y 17 m.

- *Unidad US-2b*

Es el estrato sísmico más profundo, con velocidades altas de 1,852 m/s, asociadas a las andesitas poco intemperizadas, consistentes y poco fracturadas. Su espesor es mayor de 20 m.

#### 4.1.3.4 Túnel II y deslizamiento Ocolusen

En el túnel II se llevo a cabo una exploración sísmica más completa, ya que se investigo tanto el tramo final y portal de salida del túnel II, como la zona del deslizamiento de Ocolusen II.

Para el túnel se llevaron a cabo cinco tendidos longitudinales, ubicados dos en el portal de entrada (T-16 y T-17) y tres en el portal de salida (T-2, T-3 y T-4); así como tres

transversales en la zona del portal de salida (T-11, T-12 y T-14); todos de 120 m de longitud.

En la zona del deslizamiento Ocolusen se realizaron, además de los tendidos del túnel, ocho tendidos adicionales (T-1, T-5, T-6, T-7, T-8, T-9, T-10, T-13 y T-15) tanto longitudinales como transversales al túnel.

Los resultados de los tendidos sísmicos realizados en el portal de entrada del túnel II, se integraron en la sección geotécnica de este túnel.

Con todos los tendidos sísmicos realizados en la zona del portal de salida y deslizamiento Ocolusen se efectuaron tres secciones longitudinales al túnel (LS-1, LS-2 y LS-3) y tres secciones transversales (LS-4, LS-5, LS-6 y LS-7), las cuales se presentan en el plano 4.4.

El estudio geológico indica que en la zona del túnel del se presentan intercalaciones de brechas volcánicas y derrames andesíticos, pertenecientes a la secuencia volcánica andesítica TM bv-an; y en el área del portal de salida, se encuentran materiales producto de los deslizamientos antiguos (Qd) cubriendo a las roca volcánicas.

#### *Unidades geosísmicas*

En este corte se determino la presencia de cinco Unidades Geosísmicas, con los rangos de velocidad y tipos de material asociados que se resumen en la Tabla 4.1.5.

*Tabla 4.1.5 Unidades geosísmicas - Portal de salida túnel II y deslizamiento Ocolusen*

Unidad Geosísmica	Velocidad primaria (m/s)	Características de los materiales
US-1	600 - 940	Material deslizado, medianamente consolidado. Presenta una capa superficial de muy baja velocidad (150 a 300 m/s) y reducido espesor, de suelos poco consolidados.
US-2	1,200 - 1420	Suelos lacustres arcillosos, medianamente consolidados
US-3	600 - 900	Toba intemperizada y poco consistente
US-4a	750 - 1,200	Andesita muy intemperizada, medianamente consistente y muy fracturada.
US-4b	1350 - 2400	Andesita poco intemperizada, consistente y fracturada

### *Descripción de las unidades geosísmicas*

- *Unidad US-1*

Esta unidad geosísmica se asocia con los depósitos de deslizamiento (Qd) ubicados en la zona del portal de salida; se caracteriza por presentar velocidades muy bajas a bajas, de 600 a 940 m/s, que indican que se trata de un material poco a medianamente consolidado; con espesores de 5 a 10 m en la parte alta y baja del deslizamiento; mientras que en la parte media, alcanzan espesores entre 15 y 20 m.

- *Unidad US-2*

Esta unidad se asocia con los depósitos lacustres (Q l) que se presentan en la parte baja del terreno, subyaciendo a los depósitos del deslizamiento; manifiesta velocidades medias, de 1,200 a 1,420 m/s, que indican suelos medianamente a bien consolidados; su espesor es mayor de 40 m.

- *Unidad US-3*

Esta unidad geosísmica se presenta únicamente en la parte alta del cerro, por lo que se correlaciona con las tobas pumíticas (TM tp), su velocidad es baja, de 600 a 900 m/s, lo que indica que la roca está muy intemperizada y poco consistente; su espesor oscila entre 10 y 20 m.

- *Unidad US-4a*

Esta unidad geosísmica se presenta en la capa superficial de la ladera del cerro por donde pasara el túnel II, por lo que se asocia a la unidad de brechas volcánicas y derrames andesíticos (Tm bv-an); se caracteriza por tener velocidades bajas, desde 750 hasta 1,200 m/s, lo que indica que la roca está muy intemperizada, medianamente consistente y muy fracturada; su espesor varía entre 5 y 10 m en la Línea LS-1, de 10 a 20 m en la LS-2, sin embargo, en la LS-3 llega a presentar espesores superiores a 40 m.

En la parte baja del terreno, la línea LS-4 se realizó sobre la traza de la falla La Paloma, arrojando velocidades bajas, de 948 m/s en los 40 m de investigación, lo que indica que la roca se encuentra muy alterada, poco consistente y muy fracturada.

- *Unidad US-4b*

Esta unidad geosísmica se presenta en por debajo de la unidad US-4a, por lo que también se asocia a la unidad de brechas volcánicas y derrames andesíticos (Tm bv-an); sin embargo sus velocidades son medias a altas, desde 1,350 hasta 2,400 m/s, lo que indica que la roca está poco intemperizada, consistente y fracturada; su espesor se desconoce, pero es mayor de 20 m.

## 4.2 ESTUDIO ELECTRICO

En los métodos eléctricos la circulación de la corriente en el terreno, ocasiona la creación de diferencias de potencial, cuya magnitud va a depender de la distribución de las resistividades que el subsuelo presente en los diferentes tipos de materiales que lo constituyen. Las diferencias de tensión o de potencial se miden entre dos puntos del terreno, mediante el uso de un voltímetro de alta precisión integrado al sistema y con electrodos que se colocan en la superficie del terreno. Con el método electromagnético (TEM) se pretende mostrar una distribución del subsuelo en términos de homogeneidad basados en la caracterización resistiva. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, es posible obtener una imagen lo más real posible de las condiciones del subsuelo.

En las secciones del subsuelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia del agua, provoca cambios importantes en la resistividad que es el parámetro experimental de campo que se mide.

### 4.2.1 Trabajos de campo

#### a) Descripción del dispositivo de campo

Para la obtención de las resistividades se empleo el arreglo de Loop coincidente, que es una estructura de bobina en donde los cuatro lados de la bobina se tienden con cable medido y se alinean con un GPS (figura 4.2.1).

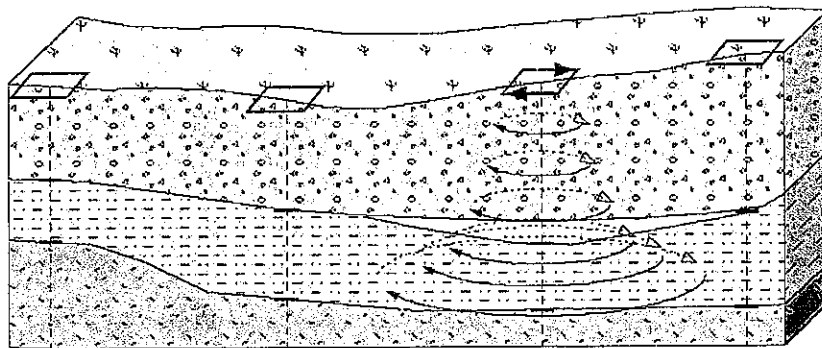


Figura 4.2.1 Arreglo de Loop coincidente

El Loop que se utilizó en este trabajo fue de 300 x 300 m, de manera de alcanzar profundidades de investigación del orden de 200 m

En el Anexo 4.3 se incluyen las mediciones de campo y fotografías de los sitios de cada TEM que se realizó.

b) *Distribución de los sondeos electromagnéticos*

Se llevaron a cabo cincuenta (50) sondeos electromagnéticos (TEM), los cuales se distribuyeron de manera de cubrir las zonas de mayor importancia para los objetivos de este estudio, que son: Túnel II, el portal de salida túnel II y la zona del deslizamiento Ocolusen.

Cabe mencionar que debido a la presencia de líneas de alta tensión en la zona del deslizamiento Ocolusen y la influencia que estos pueden provocar en las mediciones de la resistividad, algunos TEM's no fueron realizados exactamente sobre la traza del túnel.

En la figura 4.2.2 se muestra la zona de estudio y la ubicación de los sondeos electromagnéticos (TEM); en la Tabla 4.2.1 se presentan las coordenadas de cada sondeo (UTM-DATUM WGS84), y en el Plano 4.1 se muestra con mayor detalle la distribución general de los sondeos en cada una de las zonas de estudio.

c) *Equipo empleado*

- Equipo Sirotek MK3, con un receptor de 500Hz con 3 canales simultáneos verdaderos.
- Cables de recepción de corriente
- Programa TEMIXS para el proceso primario de los datos.
- Programa WINGLINK para utilizarlo como base de datos, formar secciones y mapas de resistividad.

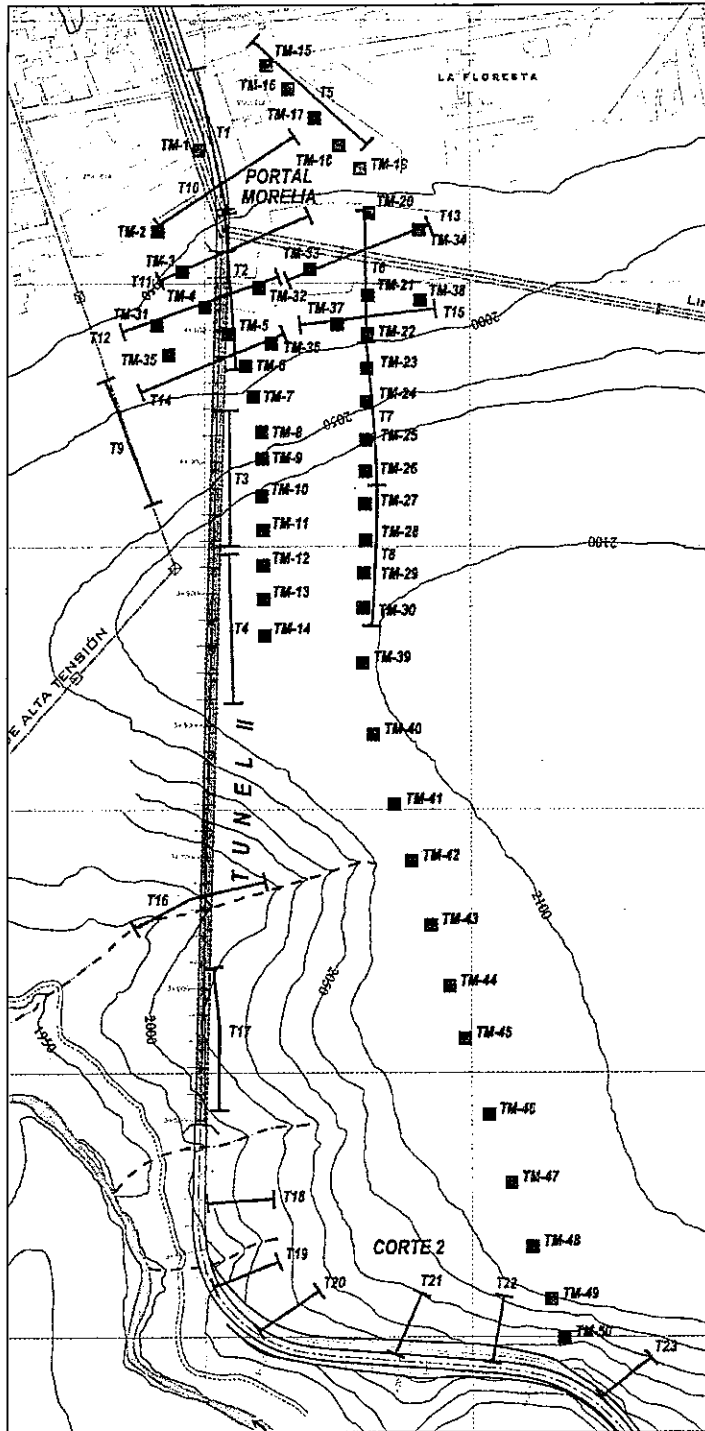


Figura 4.2.2 Ubicación general de los sitios de realización de los TEM

Tabla 4.2.1 Coordenadas UTM de los sitios TEM (Datum WGS84)

TEM	X	Y	Elevación
TM-01	274396	2177900	1926.603
TM-02	274365	2177839	1932.374
TM-03	274383	2177808	1956.023
TM-04	274400	2177781	1970.988
TM-05	274418	2177760	1980.494
TM-06	274431	2177736	1990.597
TM-07	274437	2177713	2011.771
TM-08	274443	2177686	2039.91
TM-09	274444	2177666	2050.588
TM-10	274443	2177637	2062.028
TM-11	274444	2177612	2070.571
TM-12	274444	2177585	2077.767
TM-13	274444	2177560	2082.108
TM-14	274445	2177532	2082.464
TM-15	274447	2177965	1920.359
TM-16	274463	2177947	1922.933
TM-17	274483	2177925	1928.854
TM-18	274501	2177904	1931.736
TM-19	274517	2177886	1935.286
TM-20	274524	2177853	1966.908
TM-21	274523	2177790	1981.53
TM-22	274522	2177761	1995.118

---

TM-23	274522	2177734	2025.372
TM-24	274522	2177709	2047.621
TM-25	274521	2177680	2059.253
TM-26	274521	2177656	2066.967
TM-27	274520	2177632	2075.321
TM-28	274521	2177604	2083.239
TM-29	274520	2177579	2089.515
TM-30	274519	2177553	2095.642
TM-31	274363	2177768	1963.865
TM-32	274441	2177796	1973.23
TM-33	274479	2177810	1974.109
TM-34	274561	2177840	1971.754
TM-35	274373	2177744	1976.468
TM-36	274450	2177754	1989.888
TM-37	274500	2177768	1988.386
TM-38	274562	2177786	1984.704
TM-39	274519	2177511	2097.078
TM-40	274526	2177457	2090.905
TM-41	274542	2177404	2081.791
TM-42	274555	2177361	2076.709
TM-43	274569	2177312	2077.024
TM-44	274583	2177265	2078.091
TM-45	274595	2177226	2078.326
TM-46	274613	2177168	2077.316

---



TM-47	274630	2177117	2073.928
TM-48	274646	2177068	2069.221
TM-49	274660	2177028	2057.642
TM-50	274670	2176999	2034.757

#### 4.2.2 Procesamiento eléctrico

El proceso de los datos de campo se inicia mediante el análisis estadístico del compendio de registros obtenidos para cada sitio de TEM, con estos a su vez se define una curva de decaimiento de voltaje la cual es transformada a las tradicionales curvas de resistividad aparente. Posteriormente esta curva de resistividad aparente es procesada, obteniendo para cada sitio un modelo unidimensional; en una primera etapa mediante el modelado por capas planas, siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones.

Una segunda etapa en el proceso de la curva de resistividad aparente es aplicar un algoritmo mediante una regresión tipo Occam con lo cual se logra obtener un modelo multicapas (17 capas) para integrar secciones y simular un comportamiento bidimensional de la sección (figura 4.2.4).

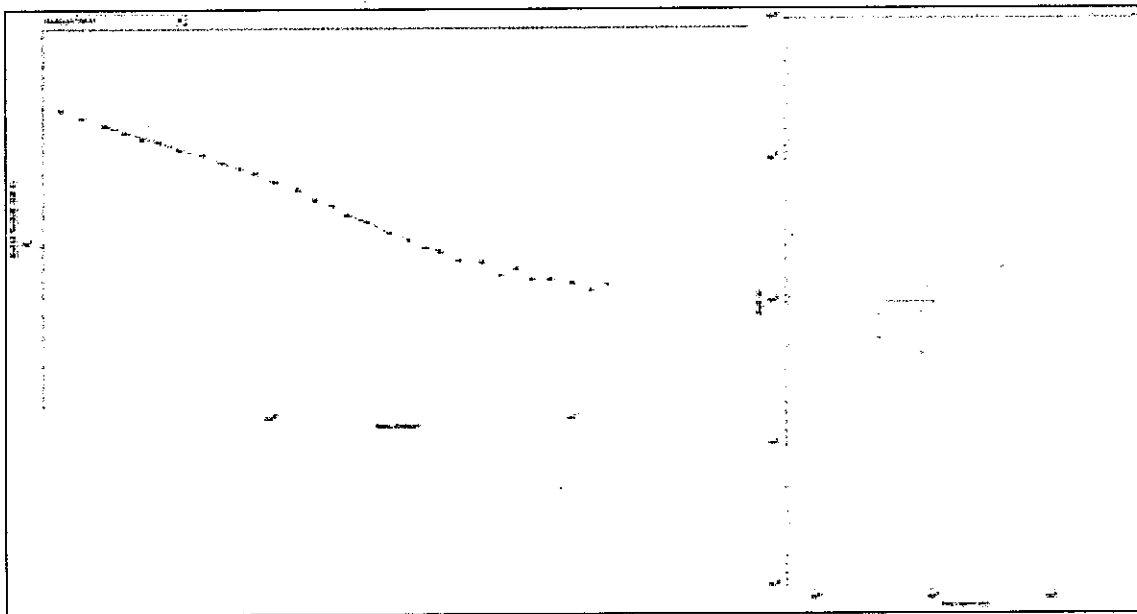


Figura 4.2.4 Modelo de capas planas (en verde) y multicapas (magenta)

Los pasos seguidos en el procesado de los registros de campo son:

- Transferencia de los registros del equipo "TERRATEM" a la computadora.
- Edición de las curvas registradas con cada ganancia para obtener una curva final de  $nV/AMP$  contra tiempo (curva de decaimiento).
- Conversión de la curva de decaimiento a Resistividad Aparente contra tiempo
- Cálculo del modelo estratificado
- Cálculo del modelo suavizado (inversión Occam)
- Impresión gráfica del modelo unidimensional
- Transferencia de las curvas y los modelos generados al paquete WINGLINK
- En Winglink, formación de la base de datos
- Elaboración de plantas y secciones de isorresistividad e impresión de resultados gráficos.

La obtención de modelos geoelectricos se realizo de la siguiente manera:

- Modelo Suavizado (Multicapas):

El procesado de los datos consiste en obtener los modelos suavizados mediante una regresión tipo Occam, en la que se propone una resistividad inicial y una final, basada en los datos de campo.

El algoritmo requiere de un número de capas inicial, un valor de ajuste al que se quiere llegar y un número máximo de iteraciones, estos tres últimos parámetros no intervienen en la obtención del modelo suavizado, por lo que este sólo depende de los valores de resistividad de campo. Para esto utiliza una regresión Ridge, para encontrar un modelo que cumpla con el error marcado en el ajuste o con el mínimo error posible.

- Modelo Unidimensional (Capas planas):

También los datos fueron procesados por el modelado por capas o unidimensional se hizo siguiendo el método clásico de prueba y error, en el que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de la curva de campo, las pendientes de la curva y los tiempos a los que ocurren las inflexiones. Se aprovechó la facilidad del paquete TEMIXS que permite la interacción con la computadora en un proceso conocido como interpretación interactiva.

Este proceso posibilita que el intérprete modifique los parámetros del modelo y presenta el cálculo de las curvas teóricas de las modificaciones realizadas, esta característica hace que el ajuste del modelo sea rápido.

### 4.2.3 Resultados Túnel II y deslizamiento Ocolusen

Se realizaron un total de cuatro líneas de investigación eléctricas distribuidas en la zona del túnel II y del deslizamiento Ocolusen II, denominadas: LE-1, LE-2, LE-3 y LE-4; cuya ubicación se muestra en los planos 4.5 y 4.6.

La línea eléctrica LE-1 se efectuó con una orientación N-S, paralela al Túnel II y un poco al norte de este, iniciando por el sur en el río Chiquito y terminando en la parte baja del deslizamiento Ocolusen II.

La línea eléctrica LE-2 se realizó con una orientación N-S y va sobre la traza del Túnel II, en su parte final.

Las líneas eléctricas LE-3 y LE-4 se efectuaron en sentido transversal (E-W) en la zona de salida del túnel II y del deslizamiento Ocolusen II.

Para cada línea de investigación se construyó una sección geoelectrica, que muestra los valores de resistividad en el subsuelo, su distribución horizontal, continuidad vertical y las unidades geoelectricas determinadas.

Las secciones eléctricas fueron elaboradas con los dos métodos de procesamiento: capas planas y multicapas; eligiéndose el primer método para presentar los resultados eléctricos en las secciones, sin embargo, la línea LE-1 también se presenta con el método de multicapas. Estas se presentan en los planos 4.5 y 4.6.

#### *Criterios utilizados para la diferenciación de las unidades geoelectricas*

Con objeto de asociar los valores de resistividad a las unidades litológicas identificadas en la zona de estudio, se tomó en cuenta la información litológica de perforaciones profundas realizadas en exploraciones geohidrológicas y que se encuentran vinculadas a valores de resistividad obtenidos mediante sondeos eléctricos verticales (SEV's) o en caso a TEM's; en la tabla 4.2.2, se presentan los valores resistivos asociados a diferentes litologías.

Los materiales clásticos de granulometría fina: arcillas y arenas encontradas en los depósitos lacustres y en zonas poco profundas, así como los materiales volcánicas a profundidad, en general tienen valores bajos de resistividad, menores de 10  $\Omega$ -m.

Los depósitos de granulometría media: arenas y gravas, que se encuentran en depósitos aluviales y fluviales, así como en las rocas piroclásticas (brechas y tobas) presentan resistividades medias entre 20 a 40  $\Omega$ -m.

Las brechas y tobas compactas, así como los derrames andesíticos fracturados, se asocian a resistividades medias altas, entre 50 y 100  $\Omega$ -m.

Las rocas más compactas, tanto los derrames andesíticos como riolíticos, tienen por lo general resistividades altas, mayores de 100  $\Omega$ -m.

Cabe mencionar que la presencia de grietas o fracturas generadas por fenómenos de tensión pueden modificar los valores de resistividad, incrementándose en la medida de que una mayor amplitud de estas e propicia la presencia del aire entre los espacios de grietas o fracturas. Por otro lado, también la existencia de zonas saturadas disminuye los valores de resistividad y la presencia de arcillas los baja notablemente.

Con base en lo anterior fue posible integrar los valores de resistividad en unidades geoelectricas y poder asociarle a estas una unidad litológica.











*Tabla 4.2.2 Vinculación de la resistividad con diferentes litologías de la zona de Morelia con base en datos de pozos profundos*

Unidad Geológica	Litologías	Resistivades (ohm-m)	Perforación
<b>Qal, Qi</b> <i>Rellenos lacustres, aluviales y fluviales</i>	<i>arenas finas y arcillas</i>	< 10	<i>Pozo Indaparapeo y pozo San Bartoleme Coro (zona del Valle de Queréndaro)</i>
	<i>arenas y gravas</i>	10 - 40	
<b>Tmr</b> <i>Secuencia piroclastica riolítica</i>	<i>derrames riolíticos</i>	100 - 200	<i>Pozo Tecnológico (zona de la Loma de santa María)</i>
	<i>tobas arenosas</i>	20 - 40	
<b>TmBv-An</b> <i>Secuencia piroclastica y derrames andesíticos</i>	<i>derrames andesíticos compactos</i>	120 - 330	<i>Pozo Hoyo 2 (zona alta, campo de golf Altozano)</i>
	<i>derrames andesíticos fracturados</i>	60 - 120	
	<i>alternacia de brechas, tobas y material</i>	30 - 90	
	<i>arenas volcanicas y tobas</i>	15 - 30	
	<i>arenas volcanicas finas y tobas</i>	5 - 15	

*Unidades Geoeléctricas*

La gama de resistividades que se presentan en el subsuelo de la zona se integro en cinco unidades geoeléctricas (UE-1 a UE-5) y estas a su vez se subdividieron en varias subunidades (UE-1a, UE-1b, UE-3a, UE-3b, UE-4a, UE-4b, UE-4c, UE-4d), esta zonificación se fundamento principalmente en la distribución de los valores de resistividad y sus espesores, pero también se tomo en cuenta su ubicación geográfica y el modelo geológico de la zona de estudio.

En la tabla 4.2.3 se presenta un resumen con las principales características de las unidades geoeléctricas.

UNIDAD GEOELÉCTRICA	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	UNIDAD LITOLÓGICA	DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL
 UE-1a	5 - 50	DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTO Qd	MATERIAL DESLIZADO, SUELTO, EN MATRIZ ARCILLOSA
 UE-1b	30 - 80		MATERIAL DESLIZADO, MAS COMPACTO O MATRIZ ARENOSA
 UE-2	1 - 15	DEPÓSITOS ALUVIALES Y LACUSTRES Ql	LIMOS, ARENAS Y GRAVAS
 UE-3a	70 - 180	TOBA PUMÍTICAS TM tp	ROCAS COMPACTAS O MATRIZ ARENOSA
 UE-3b	15 - 40		ROCAS POCO COMPACTAS O MATRIZ ARCILLOSA
 UE-4a	50 - 310	ANDESITAS Y BRECHAS VOLCÁNICAS TMbv-an	SUELOS Y ROCAS MUY INTEMPERIZADAS
 UE-4b	210 - 770		ROCA ITEMPERIZADA CON FRACTURAS ABIERTAS
 UE-4c	70 - 350		ROCA SANA CON PREDOMINIO DE ANDESITAS COMPACTAS Y SECAS
 UE-4d	20 - 100		ROCA SANA CON PREDOMINIO DE BRECHA VOLCÁNICA, COMPACTA Y POSIBLEMENTE SALTURADAS.
 UE-5	1 - 20	DEPÓSITOS VULCANICLÁSTICOS ANDESÍTICOS Tmpc	ARENAS VOLCÁNICAS POSIBLEMENTE SATURADAS.

*Tabla 4.2.3 Unidades Geoeléctricas*

Los valores de resistividad de cada Tendido Electromagnético y la zonificación del subsuelo en unidades geoelectricas se presentan en cinco secciones geoelectricas, que se encuentran en los planos:

- Plano 4.5 Sección geoelectrica Túnel II
- Plano 4.6 Secciones geoelectricas portal salida Túnel I

#### *Descripción de las unidades geoelectricas*

A continuación se presenta una descripción de cada unidad geoelectrica, mencionando su distribución, rangos y valores de resistividad, litología asociada y espesores.

- *Unidad UE-1*

Esta unidad se presenta básicamente en la zona del deslizamiento Ocolusen y en el portal de salida del Túnel II; por su ubicación se han asociado con los depósitos de deslizamiento recientes que cubren a las rocas volcánicas en esa zona; y en función de sus valores de resistividad se dividió en dos subunidades: UE-1a y UE-1b.

- *Subunidad UE-1a*

Representa la capa superior de los materiales de deslizamiento; se caracteriza por presentar resistividades bajas a medias, de 5 a 50 ohm-m, en la porción alta de la zona de deslizamientos manifiesta resistividades más altas y, hacia la parte baja los valores disminuyen; esta unidad se asocia con la unidad de materiales deslizados, que deben tener una granulometría gruesa intercalados suelos arcillosos y en estado suelto; con espesores entre 10 y 20 m.

- *Subunidad UE-1b*

Se presenta por debajo de la subunidad UE-1a; manifiesta una resistividad ligeramente media de 30 a 80  $\Omega$ -m, asociada con materiales o masas rocosas deslizadas de gran tamaño en una matriz arenosa y posiblemente más compactos; y su espesor varía entre 10 y 15 m.

- *Unidad UE-2*

Esta unidad se localiza a la parte baja del terreno que corresponde a la zona final del deslizamiento Ocolusen; se caracteriza por presentar muy bajos valores de resistividad, de 1 a 15  $\Omega$ -m; por lo que se asocia a materiales arcillo-arenosos de la unidad de depósitos lacustres y que pudieran estar inter-digitados con los materiales más distantes del deslizamiento; su espesor es mayor de 100 m.

- *Unidad UE-3*

Se ubica en las partes altas del cerro que atravesara el Túnel II, por su posición topográfica esta unidad se ha asociado con rocas volcánicas riolíticas; y en función de sus valores de resistividad se dividió en dos subunidades: UE-3a y UE-3b.

- *Subunidad UE-3a*

Se presenta en la parte superficial del terreno, manifiesta resistividades medias a altas, entre 70 y 180  $\Omega$ -m, que se han asociado con las tobas pumíticas compactas o con matriz arenosa; con espesores promedio de 20 m.

- *Subunidad UE-3b*

Se encuentra por debajo de la unidad anterior, presenta resistividades bajas entre 20 y 40  $\Omega$ -m, que se han correlacionan con tobas pumíticas poco compactas o con matriz arcillosa; con espesores de 20 a 30 m.

- *Unidad UE-4*

Esta unidad es la que mayor distribución presenta en el subsuelo del área de estudio, tanto en la parte alta del cerro cubierta parcialmente por las tobas pumíticas de la unidad UE-3; como en la porción baja, donde subyace a los depósitos del deslizamiento Ocolusen de la Unidad UE-1; por lo que se corresponde a la secuencia de rocas volcánicas andesíticas de la Fm Mil Cumbres, conformada por derrames andesíticos, brechas volcánicas y tobas.

En función de sus valores de resistividad y su posición topográfica, se dividió en cuatro subunidades: UE-4a, UE-4b, UE-4c y UE-4d.

Las Unidades 4a y 4b litológicamente pueden correlacionarse con la Unidad 4c; sin embargo, las variaciones en resistividad indican circunstancias diferentes; así mientras que la Unidad 4a representa la porción de rocas andesíticas aflorantes con diferentes grados de alteración, la Unidad 4b muestra el efecto de rocas físicamente separadas, descomprimidas (con fracturas abiertas y con presencia de aire) que propician resistividades muy altas.

En contraste, la Unidad 4c representaría las condiciones de respuesta promedio de estas rocas volcánicas al paso de la corriente eléctrica; es decir, los valores más resistivos (mayores a 200  $\Omega$ -m) corresponderán a los derrames andesíticos, secos, muy compactos y poco fracturados, mientras que los valores de resistividades medias (entre 70 a 125  $\Omega$ -m) se asocian tanto a los derrames andesíticos fracturados como a la brechas volcánicas intercalados en esta secuencia.

Por último, la unidad 4d, con resistividades un poco menores puede corresponder a mayor predominio de brechas volcánicas o bien a la presencia de agua subterránea.

Las características específicas de cada subunidad de la UE-4 son las siguientes:

o *Subunidad UE-4a*

Se presenta únicamente en la ladera del cerro donde no está cubierta por las unidades UE-3 o UE-1, manifiesta resistividades con un amplio rango, desde 50 y 310  $\Omega$ -m, que se asocia con la capa de suelo y roca intemperizada y muy fracturada; con espesores entre 5 y 10 m.

o *Subunidad UE-4b*

Se encuentra en toda la ladera del cerro subyaciendo a la unidad UE-4a, y continua en la parte baja del cerro por debajo del material del deslizamiento, se caracteriza por presentar resistividades altas a muy altas de 210 y 770  $\Omega$ -m, que se asocia con las rocas andesíticas compactas y poco intemperizadas, pero con sus planos de fracturas abiertos y rellenos de aire; su espesor varía entre 20 y 30 m.

o *Subunidad UE-4c*

Esta unidad presenta una amplia distribución en el subsuelo ya que tiene continuidad en todo el cerro que atravesara el túnel II y se distingue por su potente espesor, encontrándose en general por encima de la cota 1,975; los valores de resistividad son medios a altos, desde 70 hasta 370  $\Omega$ -m ; por lo que se considera que esta unidad presenta un mayor predominio de derrames andesíticos compactos y secos, además se encuentran en estado sano y poco fracturados con sus planos cerrados; su espesor varía entre 70 y 100 m.

o *Subunidad UE-4d*

Se manifiesta de forma continua por debajo de la unidad UE-4c, encontrándose entre las cotas 1,975 y 1,940 ; con valores de resistividad medios desde 20 a 100  $\Omega$ -m ; que se podrían asociarse a un mayor predominio de brechas volcánicas o a la presencia de agua subterránea; su espesor varía entre 40 y 70 m.

• *Unidad UE-5*

Esta unidad se manifestó en la porción más profunda del cerro, por debajo de la cota 1,940 y con un espesor indeterminado; se caracteriza por tener resistividades muy bajas entre 1 y 20  $\Omega$ -m), que pueden asociarse con materiales volcanoclásticos (arenas y gravas volcánicas con tobas, como se han identificado en varios de los pozos de agua profundos ubicados en las porciones altas: Cerro Verde, Altozano , Jesus del Monte y Tecnológico de Monterrey) y con altas posibilidades de que estén saturados.



### 5. INGENIERIA GEOLOGICA Y GEOTECNIA DE LAS OBRAS

En este capítulo se presenta un análisis de las condiciones geológicas y geotécnicas de las diversas obras que consideradas dentro del proyecto carretero del Ramal Camelinas, que comprende los Cortes 1 y 2, el viaducto del rio Chiquito y los túneles I y II.

En la figura 5.1 se ilustra la ubicación de las diferentes obras viales de este proyecto.

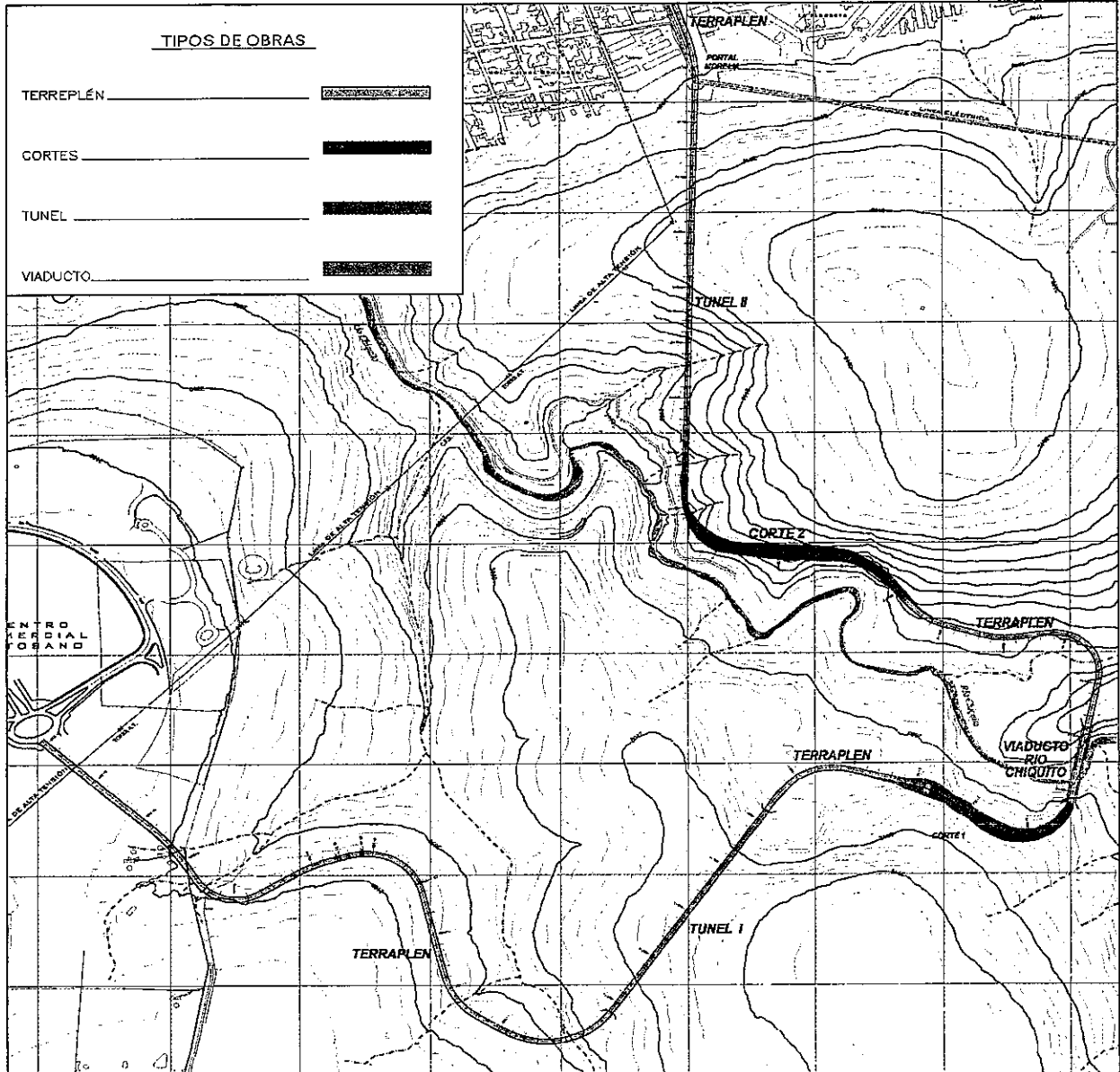


Figura 5.1 Ubicación de las obras del Ramal Camelinas, del proyecto carretero Libramiento Sur de Morelia

## 5.1 CORTE 1

El Corte 1 se localiza en el tramo intermedio del camino, en la bajada hacia el Rio Chiquito y antes de llegar al viaducto; se desarrolla en la ladera de un cerro de fuerte pendiente por la margen izquierda del rio Chiquito (Figura 5.1 y Foto 5.1.1).



Foto 5.1.1 Ubicación del Corte 1

### Características geométricas

Las características geométricas del corte fueron tomadas del proyecto de terracerías proporcionado por la SCT. En la figura 5.1.1 se presenta el perfil topográfico con la rasante del camino y en la figura 5.1.2 se muestra la configuración del corte en planta.

- Tramo: 2+060 a 2+340
- Longitud del corte: 280 m
- Altura máxima: 50 m
- Inclinación del corte en el proyecto: 1/4:1

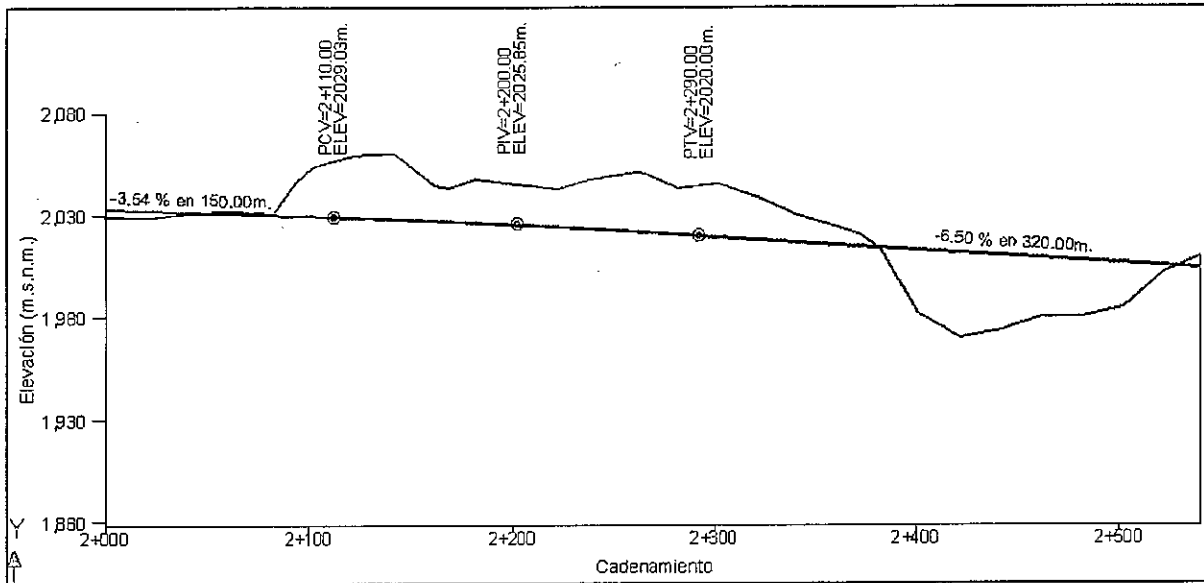


Figura 5.1.1 Perfil topográfico por el eje del camino en Corte 1

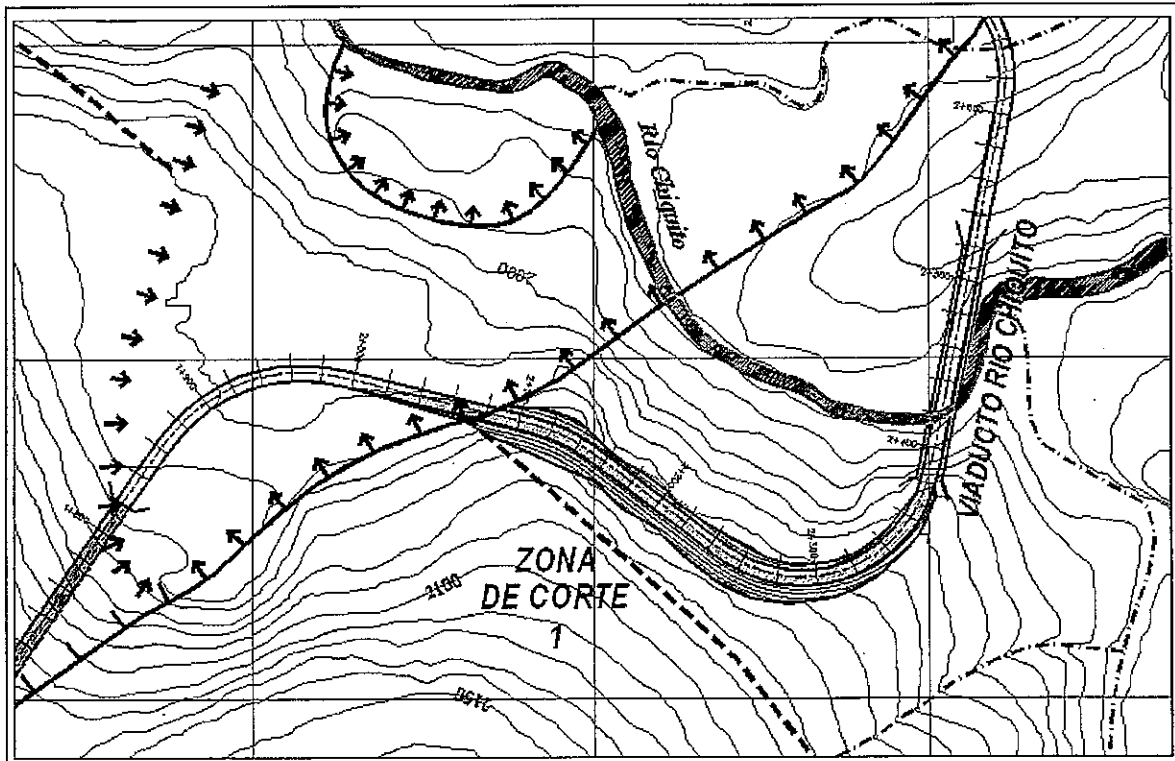


Figura 5.1.2 Configuración en planta Corte 1

### 5.1.1 Condiciones geológicas

En este apartado se presenta una breve descripción de la información geológica utilizada para realizar el análisis geológico, los tipos de roca, la zonificación geosísmica y las estructuras geológicas que se presentan en la zona del Corte 1.

#### a) Información geológica utilizada

##### a.1) Estudios previos

En este corte únicamente se dispuso de la información existente en el *Estudio Geotécnico del Camino*, elaborado por la empresa Laboratorio de Control y Análisis de Materiales en el año 2009.

Sin embargo, en el citado trabajo no se realizaron estudios geológicos superficiales ni exploración del subsuelo en el corte; y únicamente se dan algunas recomendaciones generales para su excavación y estabilidad.

##### a.2) Estudios realizados por la UNAM

Se realizó un reconocimiento geológico superficial de la zona del corte.

Se llevaron a cabo cuatro líneas de refracción sísmica de 60 m de longitud, distribuidas en la zona donde se proyecta efectuar el corte (Figura 5.1.3). En el capítulo 4.1 de este informe se presentan los resultados de este estudio geofísico.

#### b) Tipos de rocas

La zona donde se contempla realizar el corte se presenta tres tipos de roca: en la parte baja de la ladera se encuentra la secuencia volcánica andesítica, mientras que hacia la parte intermedia se presenta la unidad de tobas pumíticas y conglomerados riolíticos.

La distribución superficial de las unidades litológicas se ilustra en el mapa geológico (figura 5.1.3) y en una sección geológica representativa de la ladera (figura 5.1.4).

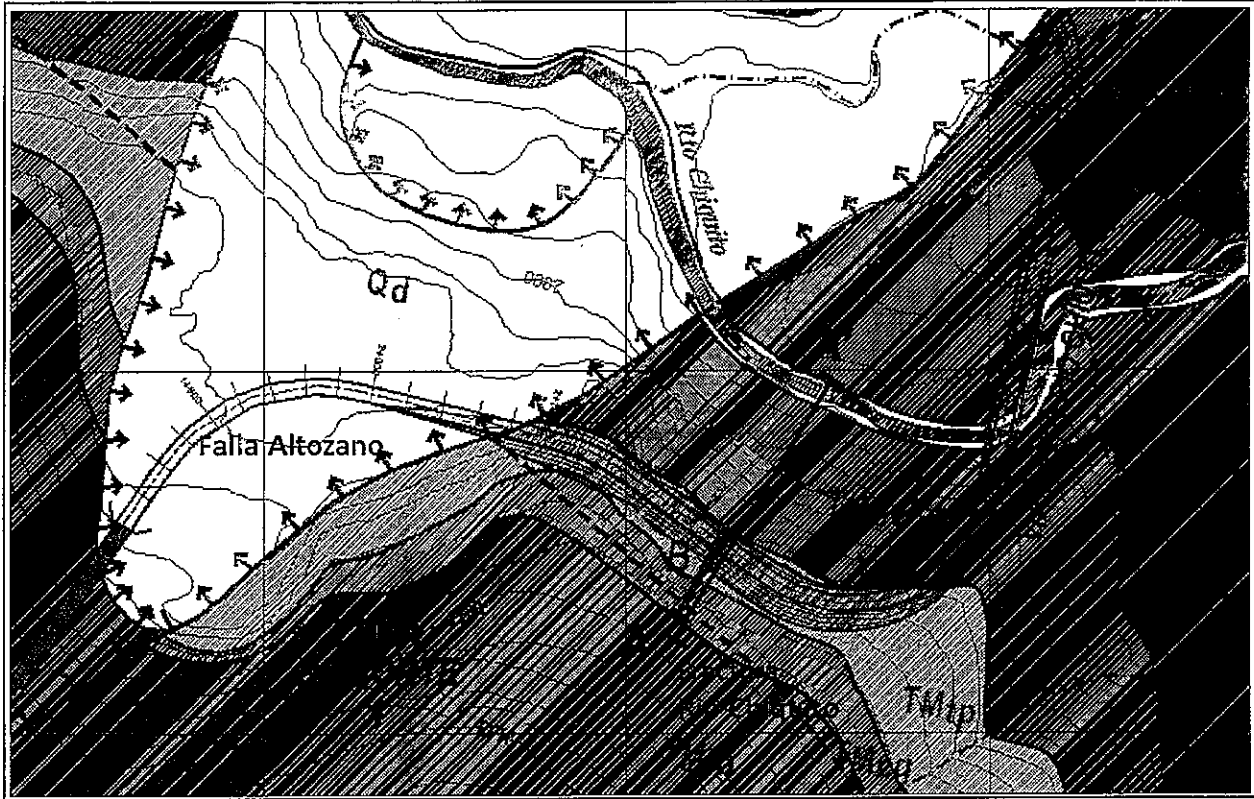


Figura 5.1.3 Mapa geológico de la zona del Corte 1

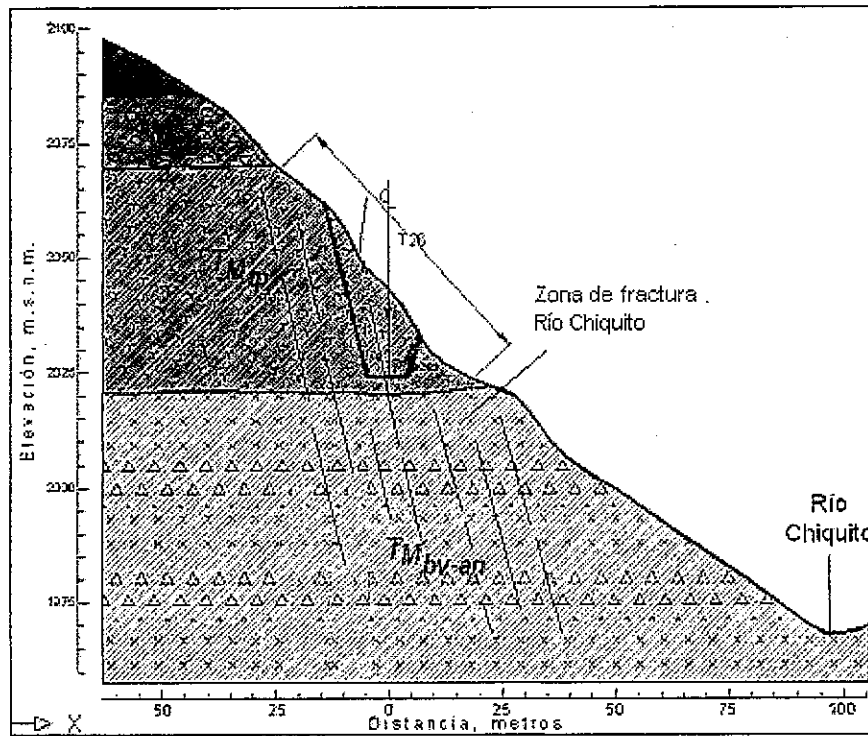


Figura 5.1.4 Sección geológica representativa A-A'

- *Unidad de Andesitas y brechas andesíticas (Tm Bv-An)*

Esta unidad litológica se presentara en la parte baja de la ladera, por debajo de la cota 2,040 msnm, por lo que probablemente no será encontrara en el corte. Está conformada por una intercalación irregular de derrames andesíticos y brechas volcánicas (Foto 5.1.2).

Las andesitas se presentan en derrames de reducido espesor y continuidad restringida; son rocas consistentes y fracturadas con planos cerrados. Mientras que las brechas volcánicas, que predominan en la secuencia, y tienen mayor continuidad; son rocas consistentes y poco fracturadas (Foto 5.1.3).

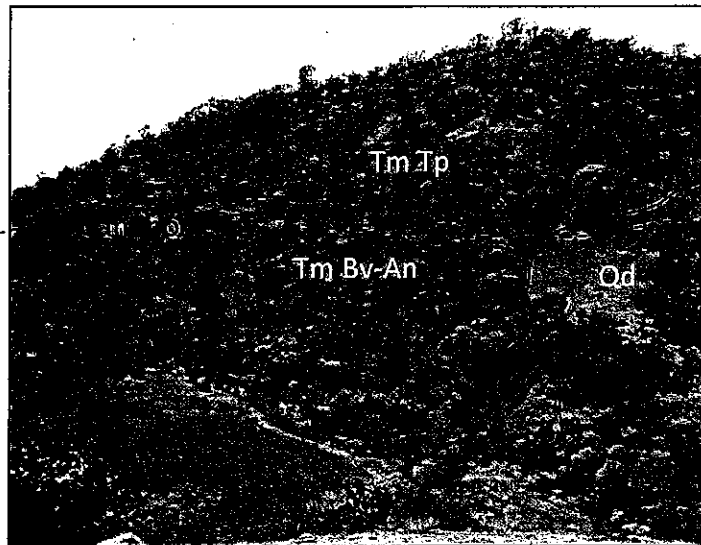


Foto 5.1.2 Afloramientos de la secuencia andesítica

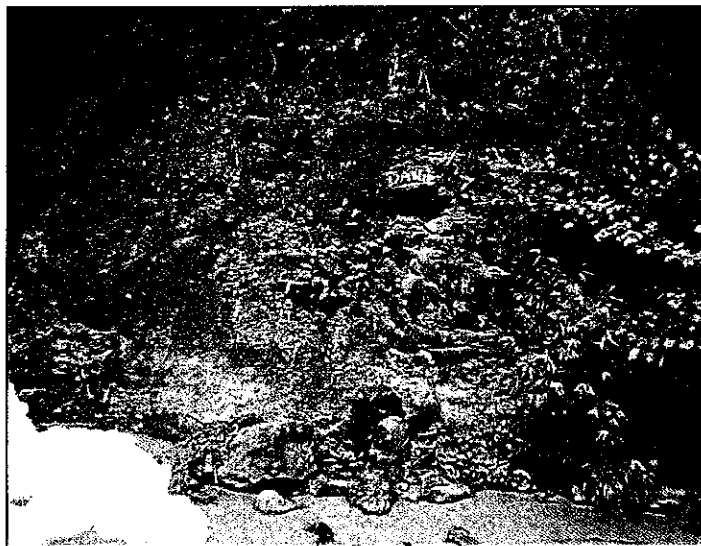


Foto 5.1.3 Andesitas y brechas volcánicas

- *Tobas pumíticas (Tm tp) y conglomerados (Tm cg)*

Cubriendo a la secuencia andesítica se presentan las unidades de tobas pumíticas y conglomerados de composición riolítica, que abarcan la mayor parte de la zona del corte (Foto 5.1.4). Estos materiales presentan una ligera inclinación hacia el SE, es decir hacia dentro del cerro (Figura 5.1.6).

Las tobas pumíticas están conformadas por fragmentos de pómez en una matriz limo-arcillosa, se encuentran poco consistentes y de baja dureza, por lo que se alteran con relativa facilidad y no presentan planos de fracturamiento (Foto 5.1.4).



*Foto 5.1.4 Tobas pumíticas poco consistentes*

Los conglomerados están conformados por fragmentos de roca redondeada a subredondeada en tamaños de 2 a 10 cm, de composición riolítica y empaçados en una matriz arcillosa; la roca está bien consolidada y consistente, con planos de fracturamiento muy espaciados (foto 5.1.5).



*Foto 5.1.5 Conglomerados riolíticos*

### **c) Zonificación geosísmica**

El estudio sísmico permitió caracterizar con mayor detalle a los materiales que se presentaron en la zona del corte, diferenciándose en tres unidades geosísmicas, tal como se ilustra en la sección geosísmica representativa mostrada en la figura 5.1.5.

- En la parte superior se presenta una capa con velocidades muy bajas (US-1), de 200 a 400 m/s, que corresponde a los suelos residuales y tobas fuertemente intemperizadas y sin consistencia; con un espesor de 1 a 4 m.
- Posteriormente, se presenta un horizonte con velocidades bajas (US-2), de 450 a 560 m/s, asociado a las tobas pumíticas muy intemperizadas, poco consistentes y de baja dureza; y con un espesor que varía entre 3 y 10 m. La parte alta de las excavaciones del corte quedaran alojados en esta unidad.
- A mayor profundidad, se presenta una ligera mejoría en la calidad de los materiales (US-3), con velocidades de 730 a 1,100 m/s, que también corresponden a tobas pumíticas medianamente intemperizadas y medianamente consistentes. La parte baja y media del corte quedaran en estos materiales.

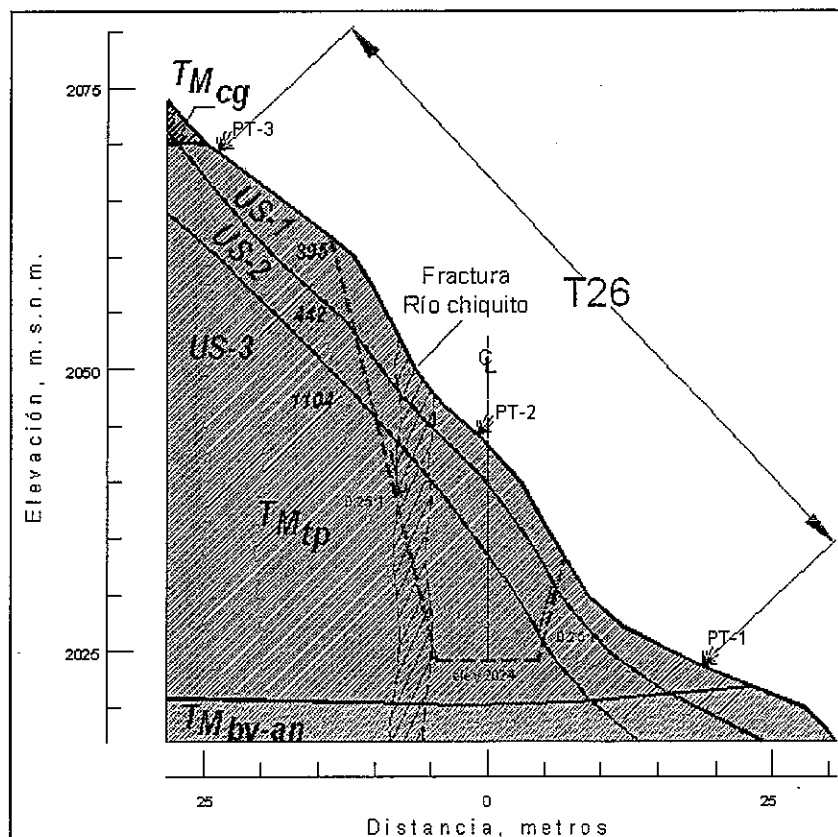


Figura 5.1.5 Sección geosísmica representativa B (km 2+220)

d) Estructuras geológicas



La zona del corte se encuentra atravesada por dos estructuras geológicas regionales: la fractura río Chiquito y la falla Túnel I; así mismo se ubica al sur de una antigua zona deslizada (figura 5.1.3).

La fractura río Chiquito lleva una orientación NW-SE y su ubicación es aproximada; se ha considerado como una zona de fractura, donde la roca debe presentar efectos del fracturamiento. Esta zona de fractura es paralela al corte y se ubica muy cercana al área donde se contempla realizar las excavaciones.

La Falla Túnel I tiene una orientación NE-SW y es una falla de tipo normal; sin embargo al parecer no afectara la excavación, ya que cruzara el camino cerca del km 2+080 donde apenas inicia el corte.

Debe mencionarse que el Corte 1 se encuentra inmediatamente al sur de una antigua zona deslizada, que se ha interpretado que fue producto de la conjugación de la presencia de materiales de baja resistencia (tobas pumíticas) y limitada por estructuras geológicas regionales (falla Túnel I y fractura río Chiquito); lo cual es un indicativo de la mala calidad geomecánica de las tobas pumíticas que conforman esta zona.

### 5.1.2 Condiciones geotécnicas

Las características geológicas muestran que la zona del corte 1 está constituida por roca de calidad pobre, específicamente de la toba pumítica por su baja compacidad y dureza y del conglomerado riolítico que presenta matriz arcillosa. La cercanía de esta zona al paso de las dos estructuras regionales ha provocado que el macizo rocoso en general presente alto grado de relajación, como muestran las bajas velocidades sísmicas registradas en todos los tendidos realizados.

Se observa que la pendiente natural del terreno en el tramo es de  $40^\circ$  a  $45^\circ$  en el tramo donde aflora la toba pumítica y el conglomerado. La información del proyecto indica para este corte que se debe excavar dejando un talud de 0.25:1, equivalente de  $76^\circ$ , pendiente que se considera difícil de mantener dadas las características de baja resistencia de estas rocas.

La altura máxima del corte, considerando la pendiente de diseño de  $1/4:1$  será de 50 m y se incrementará más si se deja la berma que se especifica en el mismo informe.

Por otra parte, debido a que la roca pumítica presenta baja dureza y un grado de fracturamiento y descompresión importante, la pendiente especificada en el diseño no será posible mantenerla y la altura del corte seguramente se incrementará a más de 80 m, con tratamientos importantes para su estabilidad ante carga sísmica y presión hidrostática.

La citada información de estudios previos no presenta análisis de estabilidad del corte, diseño geotécnico y tampoco indica los tratamientos que se requerirán para su estabilidad y protección a largo plazo, solo se limita a presentar recomendaciones generales y se anota que el diseño definitivo se realizará durante la construcción.

Por los motivos antes expuestos, se considera que el proyecto del corte 1 está inconcluso y deberá ser elaborado nuevamente, ya que como está proyectado en la actualidad presenta un riesgo potencial de inestabilidad y de erosión altos.

El diseño y los tratamientos deben considerar, además de la pendiente adecuada para la estabilidad del corte, obras de drenaje en la parte superior del corte, subdrenaje para alivio de presión hidrostática y protección superficial de la roca para evitar sea fácilmente erosionada por el agua de lluvia.

En este caso particular, se sugiere como una recomendación más amplia para la seguridad del camino y para reducir el impacto de la obra en el entorno, se modifique el trazo del camino, tratando de evita pasar por esta zona, tratando de reducir la altura de los cortes en general y ubicando otro sitio para cruzar el río Chiquito mediante un puente de mayor longitud y altura, obviamente se debe mantener la pendiente adecuada del camino.

## 5.2 CORTE 2

El Corte 2 se localiza en el tramo final del camino, después del río Chiquito por su margen derecha y antes de llegar al túnel II; se desarrolla en la ladera de un cerro con pendientes moderadas a fuertes (Figura 5.1 y Foto 5.2.1).

### Características geométricas

Las características geométricas del corte fueron tomadas del proyecto de terracerías proporcionado por la SCT. En la figura 5.2.2 se presenta el perfil topográfico con la rasante del camino y en la figura 5.2.3 se muestra la configuración del corte en planta.

- Tramo: 2+920 a 3+380
- Longitud: 460 m
- Altura máxima: 45 m
- Inclinación del corte en el proyecto = ¼:1



Foto 5.2.1 Ubicación del Corte 2

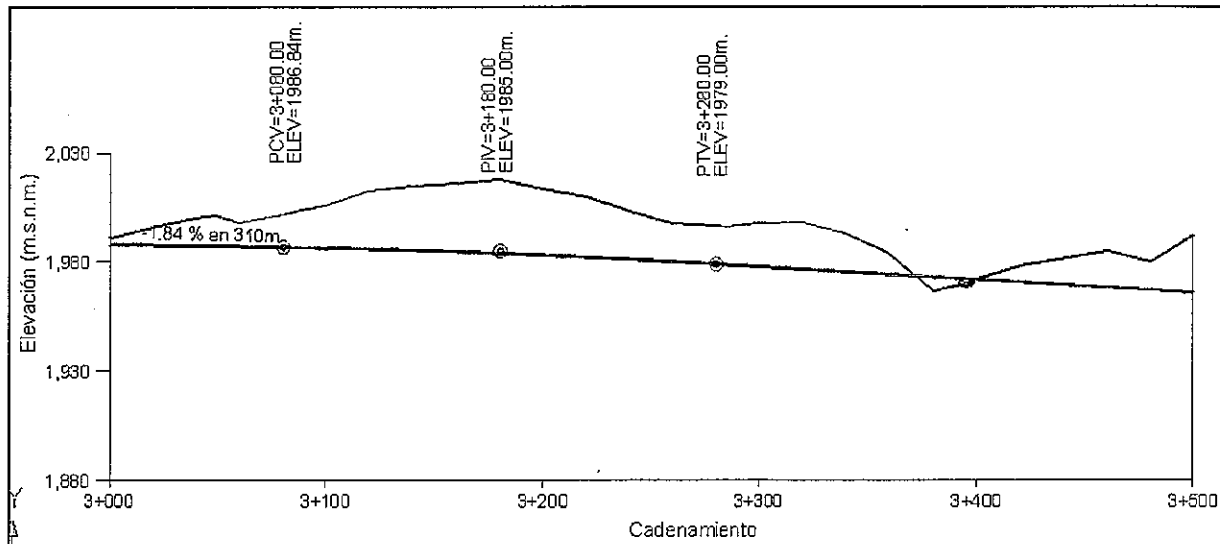


Figura 5.2.2 Perfil topográfico por el eje del camino en el Corte 2

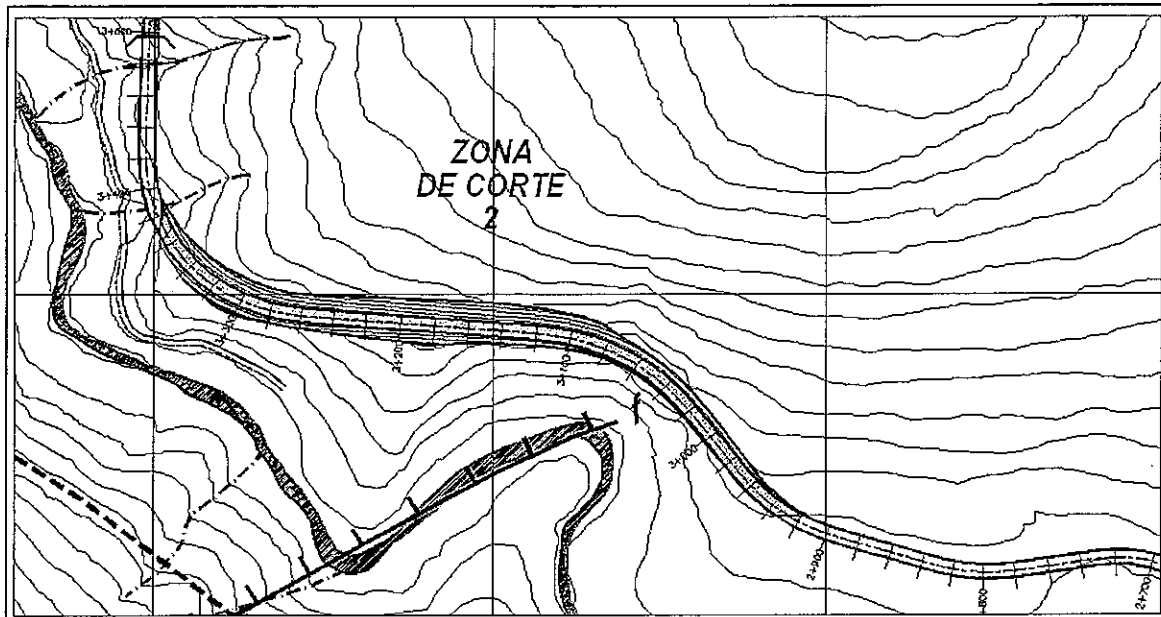


Figura 5.2.3 Configuración en planta del Corte 2

### 5.2.1 Condiciones geológicas

En este apartado se presenta una breve descripción de la información geológica utilizada para realizar el análisis geológico, los tipos de roca, la zonificación geosísmica y las estructuras geológicas que se presentan en la zona del Corte 2.

#### a) Información geológica utilizada

##### a.1) Estudios previos

Para este corte únicamente se dispuso de la información existente en el *Estudio Geotécnico del Camino*, elaborado por la empresa Laboratorio de Control y Análisis de Materiales en el año 2009.

Sin embargo, en el citado trabajo no se realizaron estudios geológicos superficiales ni exploración del subsuelo en el corte sino y únicamente se dan algunas recomendaciones generales para su excavación y estabilidad.

##### a.2) Estudios realizados por la UNAM

Se realizó un reconocimiento geológico superficial de la zona del corte.

También se llevaron a cabo seis líneas de refracción sísmica de 60 m de longitud cada una, distribuidas en la zona donde se proyecta efectuar el corte (Figura 5.1.7). En el capítulo 4.1 de este informe se presentan los resultados del estudio geofísico.

#### **b) Tipos de rocas**

La zona donde se proyecta realizar los cortes está conformada básicamente por rocas de la secuencia volcánica andesítica.

La distribución superficial de las unidades litológicas se muestra en el mapa geológico (figura 5.2.4) y en una sección geológica representativa de la ladera (figura 5.2.5).



Figura 5.2.4 Geología del Corte 2

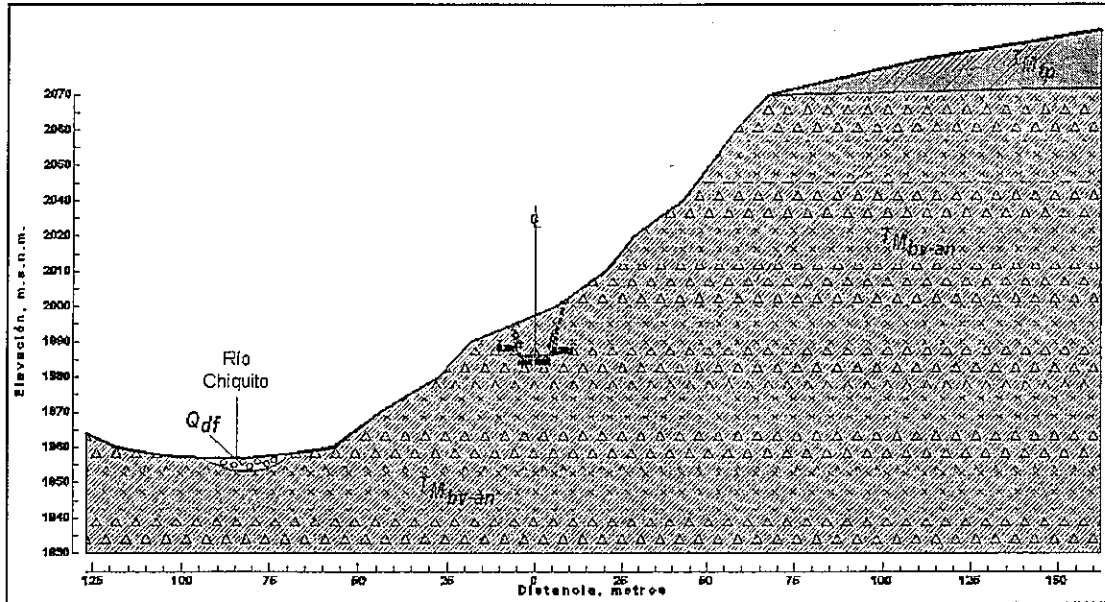


Figura 5.2.5 Sección geológica A-A', representativa del Corte 2

- Unidad de Andesitas y brechas andesíticas (Tm bv-an)

Esta unidad litológica aflora en la parte baja de la ladera derecha del río Chiquito, ya que en la parte alta está cubierta por tobas pumíticas, por lo que todo el corte en este tramo se excavará básicamente en las rocas andesíticas (Foto 5.2.2).



Foto 5.2.2 Afloramientos de la secuencia andesítica en la zona del corte

Dentro de la secuencia volcánica, el tipo de roca que mayor predominio y espesor tiene es la brecha volcánica, la cual se encuentra en general bien consolidada y resistente, con una estructura masiva, afectada por pocas fracturas (Foto 5.2.3).

Las andesitas se presentan en derrames con espesores reducidos y continuidad restringida, intercalados con las brechas volcánicas; son rocas consistentes y fracturadas con planos cerrados (Foto 5.2.4).

De manera más aislada se llegan a presentar capas con reducido espesor de tobas arcillosas, de color café amarillento, poco consistente y de baja resistencia (Foto 5.2.4).



Foto 5.2.3 Brechas volcánicas consistentes y poco fracturadas



Foto 5.2.4 Derrames andesíticos fracturados, intercalados con tobas arcillosas  
c) **Zonificación geosísmica**

El estudio sísmico permitió caracterizar con mayor detalle a los materiales que se presentarán en la zona del corte, diferenciándose tres unidades geosísmicas, tal como se ilustra en la sección geosísmica representativa, mostrada en la figura 5.2.6.

- En la parte superior se presenta una capa con velocidades muy bajas (US-1), de 300 a 800 m/s, que corresponde a los suelos residuales y/o roca fuertemente intemperizada y poco consistente; con un espesor de 1 hasta 4 m.
- Posteriormente, se presenta un horizonte con velocidades bajas (US-2), de 1,000 a 1,500 m/s, asociado a las zona de roca intemperizada, medianamente consistente y poco fracturada; esta capa solamente se detectó en la parte final del corte, a partir del km 3+260, con un espesor que varía entre 1 a 4 m.
- El horizonte inferior (US-3) es el que presenta la mayor distribución en el corte, pues se manifestó en todas las secciones analizadas, con velocidades altas, de 1,700 a 2,200 m/s, que se indican que tanto las brechas como los derrames andesíticos se encuentran poco intemperizados, consistentes y poco fracturados.

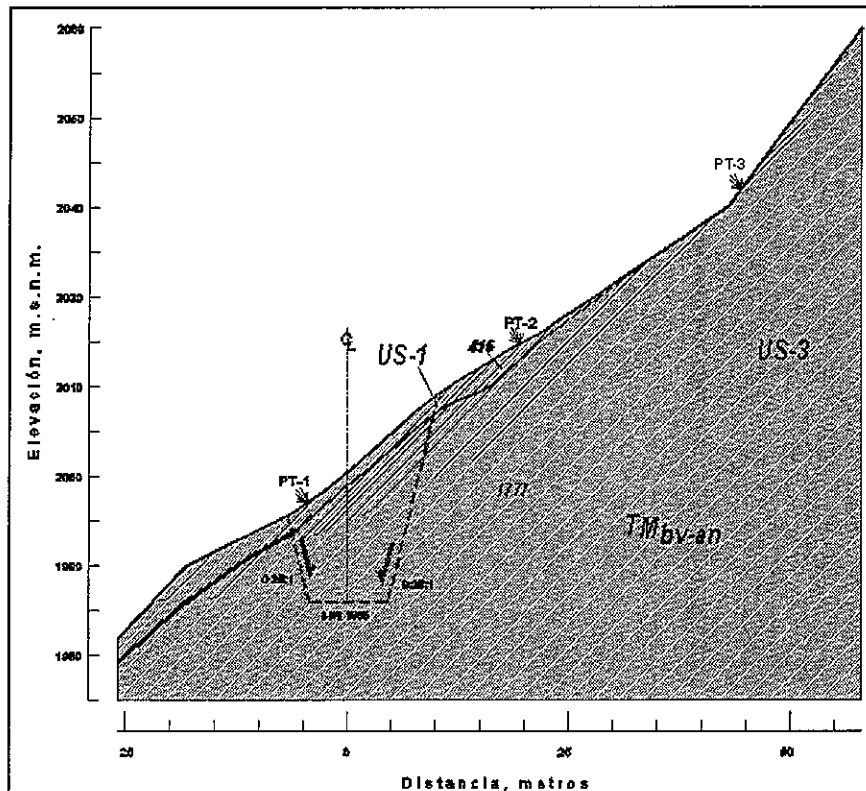


Figura 5.2.6 Sección geosísmica B, representativa del Corte 2

#### d) Estructuras geológicas



En la zona del Corte 2 no se detectaron estructuras geológicas regionales.

### 5.2.2 Condiciones geotécnicas

Las características geológicas y sísmicas muestran que el macizo rocoso que constituirá el corte 2 presenta buena calidad y se encuentra relativamente poco relajado, con menos de un 25% de índice de relajación. Tampoco está afectado por estructuras geológicas regionales, por lo que no se prevé encontrar fracturamiento intenso en el macizo. La pendiente natural del terreno en el tramo es de 30° a 35°.

La altura máxima del corte, considerando una pendiente de 0.25:1, será de 45 m y si se deja la berma recomendada en el proyecto, la altura se incrementaría un poco más.

La información revisada del proyecto del camino no presenta análisis de estabilidad del corte, diseño geotécnico y tampoco indica los tratamientos que se requerirán para su estabilidad y protección a largo plazo, se limita a presentar recomendaciones generales, sugiriendo emplear un talud de 0.25:1 y anota que el diseño definitivo de tratamientos se deberá realizar durante la construcción.

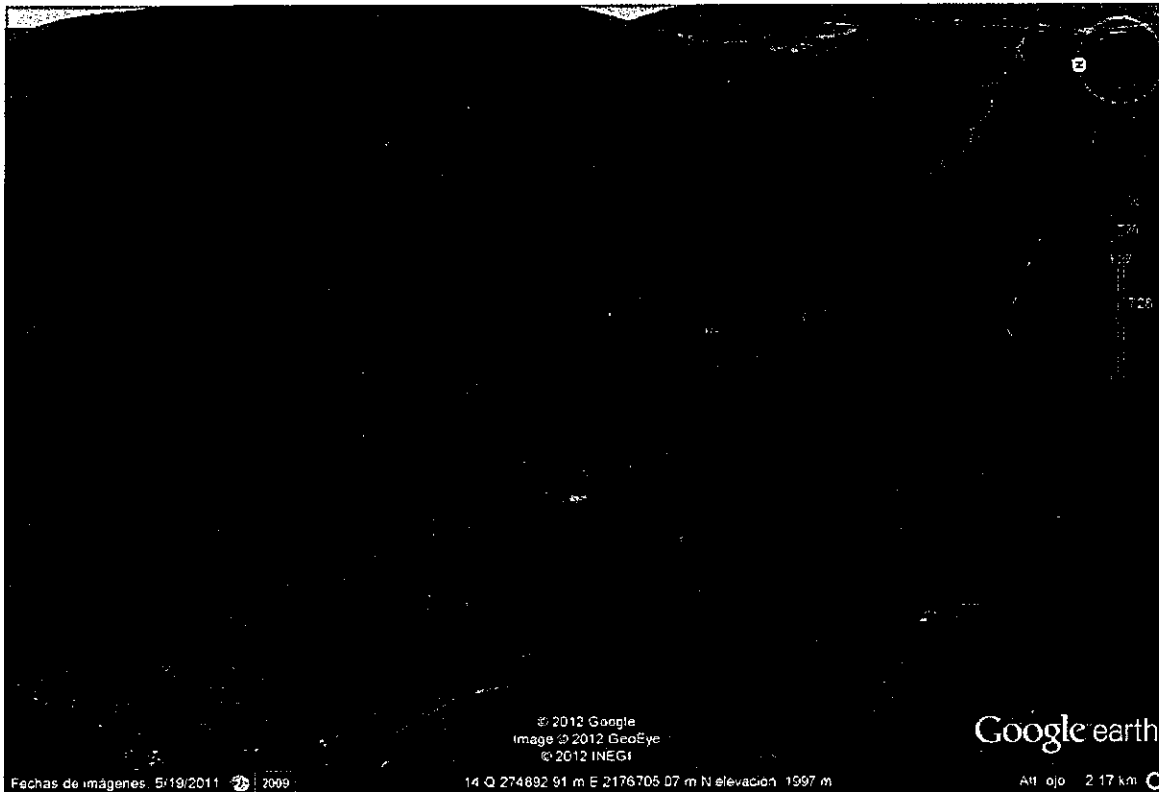
Dado que la unidad litológica predominante serán las brechas volcánicas con intercalaciones delgadas de derrames de andesita y también capas poco frecuentes de tobas arcillosas, los principales problemas que se prevén son el de caída y rodamiento de fragmentos y bloques de roca hacia el camino durante la época de lluvias y el de erosión superficial del talud debido al mismo fenómeno.

Las características geotécnicas del terreno donde se ubica el corte se consideran buenas, sin embargo, el proyecto está inconcluso y se considera que debe ser revisado tomando en cuenta toda la información existente del tramo, para que se diseñen los tratamientos necesarios para su estabilidad local, protección contra caída de bloques y erosión superficial, con el objeto de que se ejecuten conforme descienda la excavación. También serán necesarias las obras de drenaje en la parte superior del corte y de subdrenaje para alivio de presión hidrostática del interior del macizo.

Para el diseño de la pendiente definitiva se debe considerar que los primeros metros de la parte superior del talud, están formadas por roca alterada.

### 5.3 VIADUCTO

El proyecto geométrico contempla la construcción de un viaducto localizado en la parte intermedia del camino que permitirá atravesar el Río Chiquito (Figura 5.1 y Foto 5.3.1).



*Foto 5.3.1 Ubicación del Viaducto del río Chiquito*

#### Características geométricas

Las características geométricas del viaducto fueron tomadas del proyecto de terracerías proporcionado por la SCT. En la figura 5.3.1 se presenta el perfil topográfico con la rasante del camino y en la figura 5.3.2 se muestra un perfil con la ubicación de los estribos y pilas de la subestructura del puente.

- Tramo: 2+378 a 2+531
- Longitud del viaducto: 152 m
- Altura máxima: 45 m
- Subestructura: Estribo 1      Est. 2+378  
                          Pila 2              Est. 2+427  
                          Pila 3              Est. 2+478  
                          Estribo 4        Est. 2+531

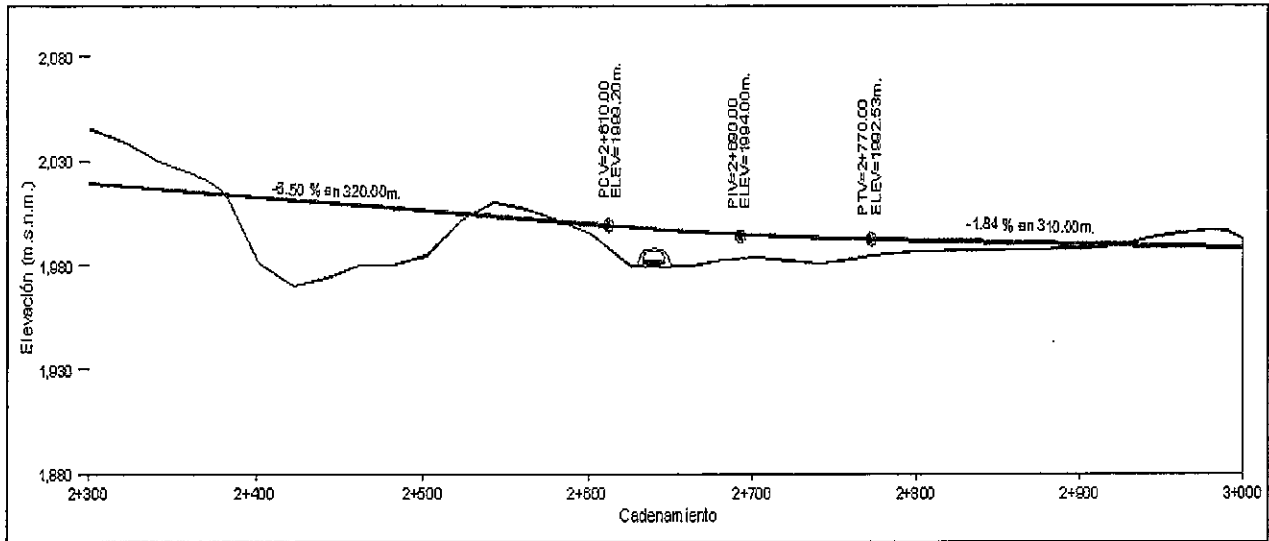


Figura 5.3.1 Perfil topográfico con subrasante en el Viaducto Rio Chiquito

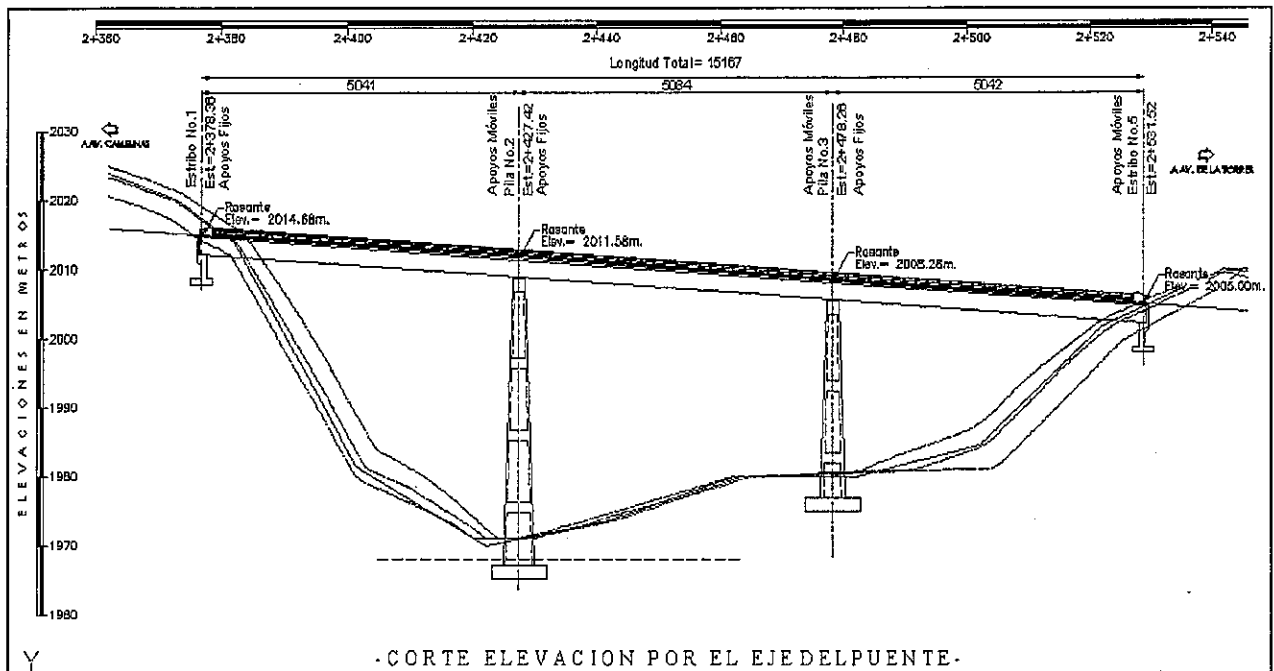


Figura 5.3.2 Perfil con la ubicación de los estribos y pilas de la subestructura

### 5.3.1 Condiciones geológicas

En este apartado se presenta una breve descripción de la información geológica utilizada para realizar el análisis geológico, los tipos de roca, la zonificación geosísmica y las estructuras geológicas que se presentan en la zona del Viaducto.

#### a) Información geológica utilizada

##### a.1) Estudios previos

En esta zona únicamente se dispuso de la información existente en el *Estudio Geotécnico del Camino*, elaborado por la empresa Laboratorio de Control y Análisis de Materiales en el año 2009.

En este estudio se realizaron tres sondeos exploratorios (SM-4, SM-5 y SM-6) y dos pozos a cielo abierto.

##### a.2) Estudios realizados por la UNAM

Se realizó un reconocimiento geológico superficial de la zona del viaducto.

Se llevó a cabo una línea de refracción sísmica de 120 m de longitud a lo largo del eje del viaducto (Figura 5.2.3). En el capítulo 4.1 de este informe se presentan los resultados completos del estudio geofísico.

#### b) Tipos de rocas

La zona donde se contempla construir el viaducto estará conformada básicamente por rocas de la secuencia volcánica andesítica.

La distribución superficial de las unidades litológicas se ilustra en el mapa geológico (figura 5.3.3).



Figura 5.3.3 Geología de la zona del Viaducto Rio Chiquito

- *Unidad de Andesitas y brechas andesíticas (Tm bv-an)*

Esta unidad litológica aflora en ambas laderas y a lo largo del cauce del río Chiquito; en la ladera izquierda forma un acantilado de fuerte pendiente (Foto 5.3.2), mientras que la ladera derecha está conformada por un lomerío de baja pendiente.

El tipo de roca que mayor predominio y espesor tiene, son las brechas volcánicas, las cuales se encuentran en generales bien consolidados y resistentes, con una estructura masiva, afectada por pocas fracturas.

Las andesitas se presentan en derrames con espesores reducidos y continuidad restringida, intercalados con las brechas volcánicas; son rocas consistentes y fracturadas con planos cerrados y de alta resistencia; estas rocas afloran claramente en el cauce del río Chiquito (Foto 5.3.3).



Foto 5.3.2 Ladera izquierda del viaducto (Estribo 1) en la secuencia andesítica



Foto 5.3.3 Derrames andesíticos sanos y resistentes en la zona del río Chiquito

### c) Zonificación geosísmica

El estudio sísmico permitió caracterizar con mayor detalle a los materiales que se presentarán en la zona del viaducto, diferenciándose en tres unidades geosísmicas, tal como se ilustra en la sección geosísmica mostrada en la figura 5.3.4.

En este caso, se contó con la información de los sondeos directos SM-4 y SM-5 que permitieron calibrar a las unidades geosísmicas.

- En la parte superior se presenta una capa con velocidades muy bajas, de 440m/s, que corresponde a los suelos residuales con un espesor de 1 a 2 m.
- Por debajo se presenta un horizonte con velocidades medias, de 1,310 m/s, asociado a la roca intemperizada y fracturada; con un espesor que varía entre 3 y 12m.
- El horizonte inferior manifiesta velocidades altas, mayores de 1,800 m/s, que se indican que la roca andesítica se encuentra poco intemperizada, consistente y poco fracturada.

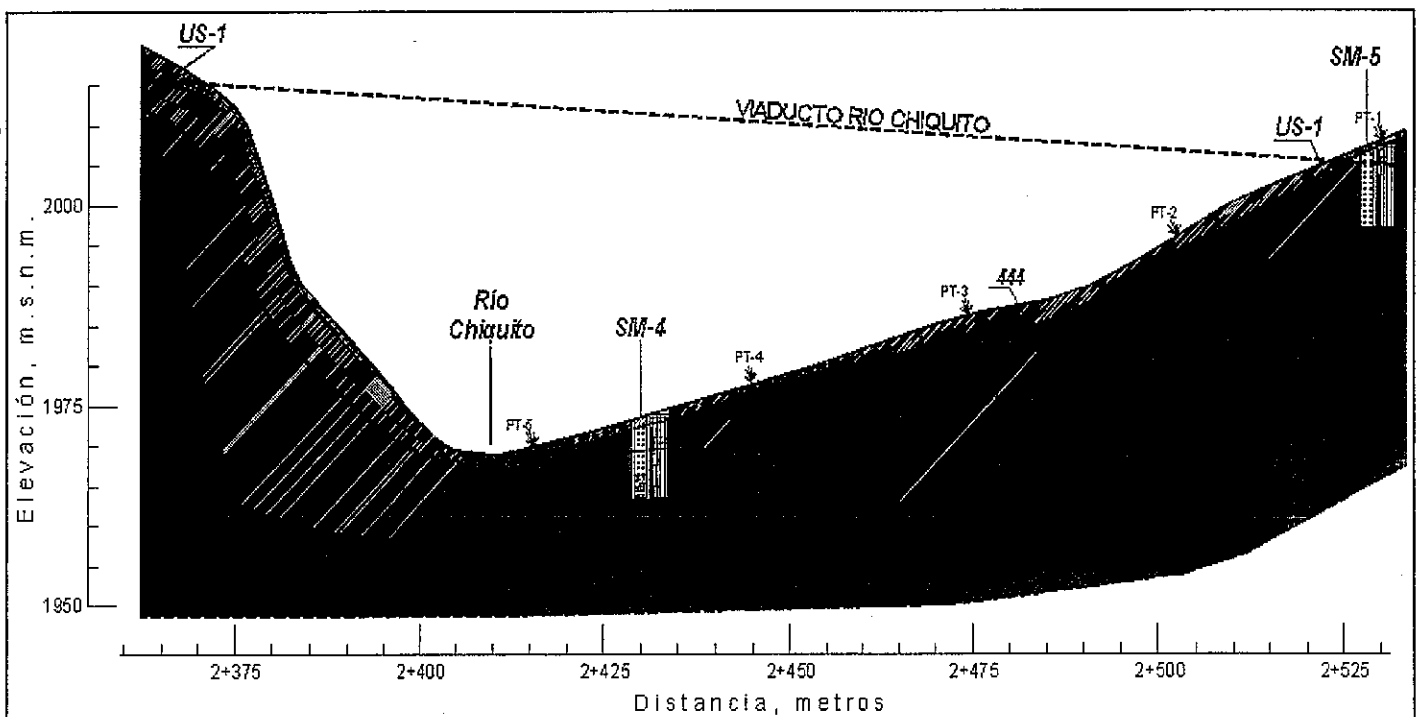


Figura 5.3.4 Sección geosísmica del viaducto

### d) Estructuras geológicas

En la zona del viaducto no se detectaron estructuras geológicas regionales.

### 5.3.2 Condiciones geotécnicas

La cimentación del viaducto en las márgenes y cauce estará ubicada en la unidad TM by-an, constituida por roca de buena calidad al nivel del desplante de los apoyos, con excepción del No. 3.

Las velocidades sísmicas registradas en esta unidad indican una cobertura pequeña de suelo y/o roca alterada de 1 a 2 m de espesor con velocidad  $V_p$  de 440 m/s, esta capa será retirada totalmente en la zona de los apoyos.

La siguiente capa presenta una velocidad de 1310 m/s con espesor variable entre 3 y 12 m, correspondiendo el menor espesor a la zona del cauce del río; la Pila No. 3 y el Estribo No. 4 quedarán desplantados en esta zona.

En la capa profunda se presenta la roca más compacta con velocidad sísmica de 1800 m/s; el Estribo No. 1 y la Pila No. 2 quedarán desplantados en esta zona.

Con base en esta información de velocidades sísmicas, los sondeos efectuados en el sitio por el proyectista y la inspección de campo, se considera que los niveles para desplante de los Estribos No. 1 y 4 y de la Pila No. 2 del puente son adecuados. Sin embargo, se sugiere que para la Pila No. 3 se baje más el nivel de desplante para que quede ubicado en la zona de roca de mayor velocidad sísmica, más competente. Respecto al Estribo No. 4, que también quedará desplantado en la segunda capa, se considera adecuado ese nivel, ya que el estribo se localiza muy retirado del cauce del río.

En el informe geotécnico del camino y viaducto, no se presentan los valores de resistencia a la compresión uniaxial de los núcleos de roca de los diferentes sondeos realizados, los cuales debieron ser utilizados en las determinaciones de la capacidad de carga; tampoco indican la forma en que se determinaron los valores del módulo de elasticidad ( $E_{150}$ ), módulo de rigidez (G), ángulo de fricción y cohesión de los distintos estratos de roca muestreados en cada sondeo, ver Tabla siguiente extraída del citado informe. Por lo anterior, no se sabe con certeza si las capacidades de carga determinadas son correctas.

Se sugiere revisar este aspecto o aclarado debidamente y en su caso revisado también el diseño estructural de los apoyos. Otro aspecto que debe ser revisado el estudio de socavación del viaducto, ya que en la redacción del mismo se hace referencia a otro puente (0+500) ubicado en otro sitio.

En general, por el tipo de roca que se tiene en esta zona, los asentamientos debido a las cargas transmitidas por el puente serán muy pequeños y se producirán la mayor parte de ellos al final de la construcción.



## PARAMETROS DE RESISTENCIA DE LA ROCA PARA EL SM-1:

Sondeo	N.A.F.	Estrato	De	A	Espesor	$\gamma_m$	Modulo de Elasticidad $E_{1,50}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	G	RQD	c	$\phi$	Tipo
No.	(m)	No.	(m)	(m)	(m)	(t/m <sup>3</sup> )		(kg/cm <sup>2</sup> )	(%)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(°)	de suelo
S.M.-1	N/E	1	0.00	9.50	9.50	1.803	30,000	2000	7.8	0.36	36°	Ta
		2	9.50	14.00	4.50	1.620	11,000	2000	4.9	0.31	31°	SM
		3	14.00	18.60	4.60	1.856	34,000	2000	10.5	0.35	36°	Ta
		4	18.60	20.10	1.50	1.710	13,000	2000	0.0	0.33	32°	SM
		5	20.10	34.40	14.30	1.870	37,000	2000	11.7	0.37	37°	Ta
		6	34.40	42.00	7.60	2.050	120,000	2000	11.9	0.70	39°	Bvb
		7	42.00	46.50	4.50	2.650	700,000	2000	11.5	2.80	42°	B
		8	46.50	50.10	3.60	2.250	220,000	2000	11.6	1.10	39°	Bvb

## 5.4 TUNEL I

El Túnel I se ubica en el tramo inicial del camino en la bajada hacia el río Chiquito.

A continuación se presenta una breve descripción de las características geométricas del túnel y posteriormente se describen las condiciones geológicas y geotécnicas.

## Características geométricas

Las características geométricas del túnel fueron tomadas del proyecto de ejecutivo elaborado por Consultec. En la figura 5.4.1 se muestra la geometría del túnel y en la figura 5.4.2 se presenta la planta topográfica y el perfil longitudinal a lo largo del túnel.

- Tramo: 1+371 a 1+819
- Longitud : 448 m
- Pendiente: 4.03%
- Ancho de corona : 12 m
- Altura túnel : 8.42 m

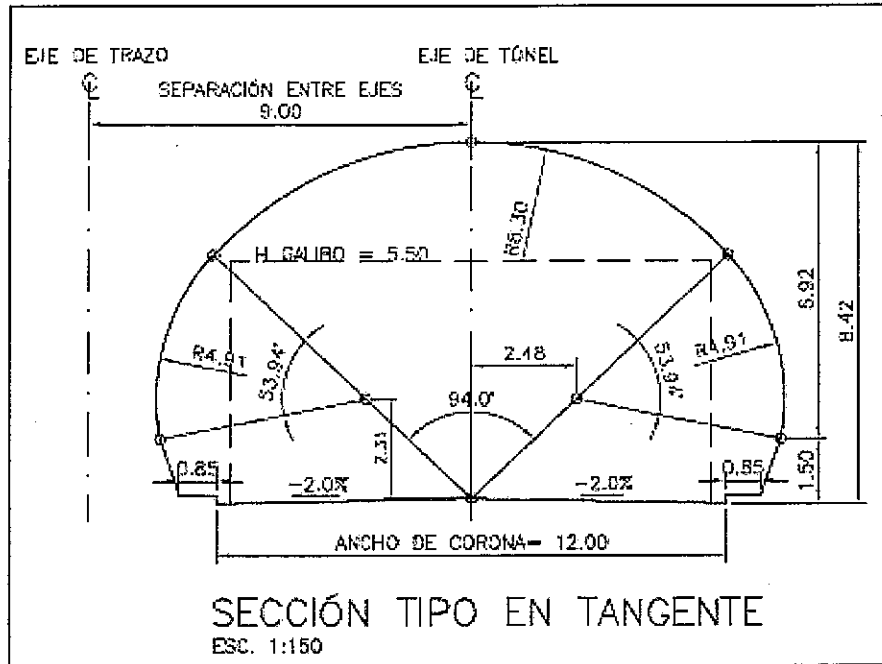


Figura 5.4.1 Sección tipo del túnel (Consultec, 2011)

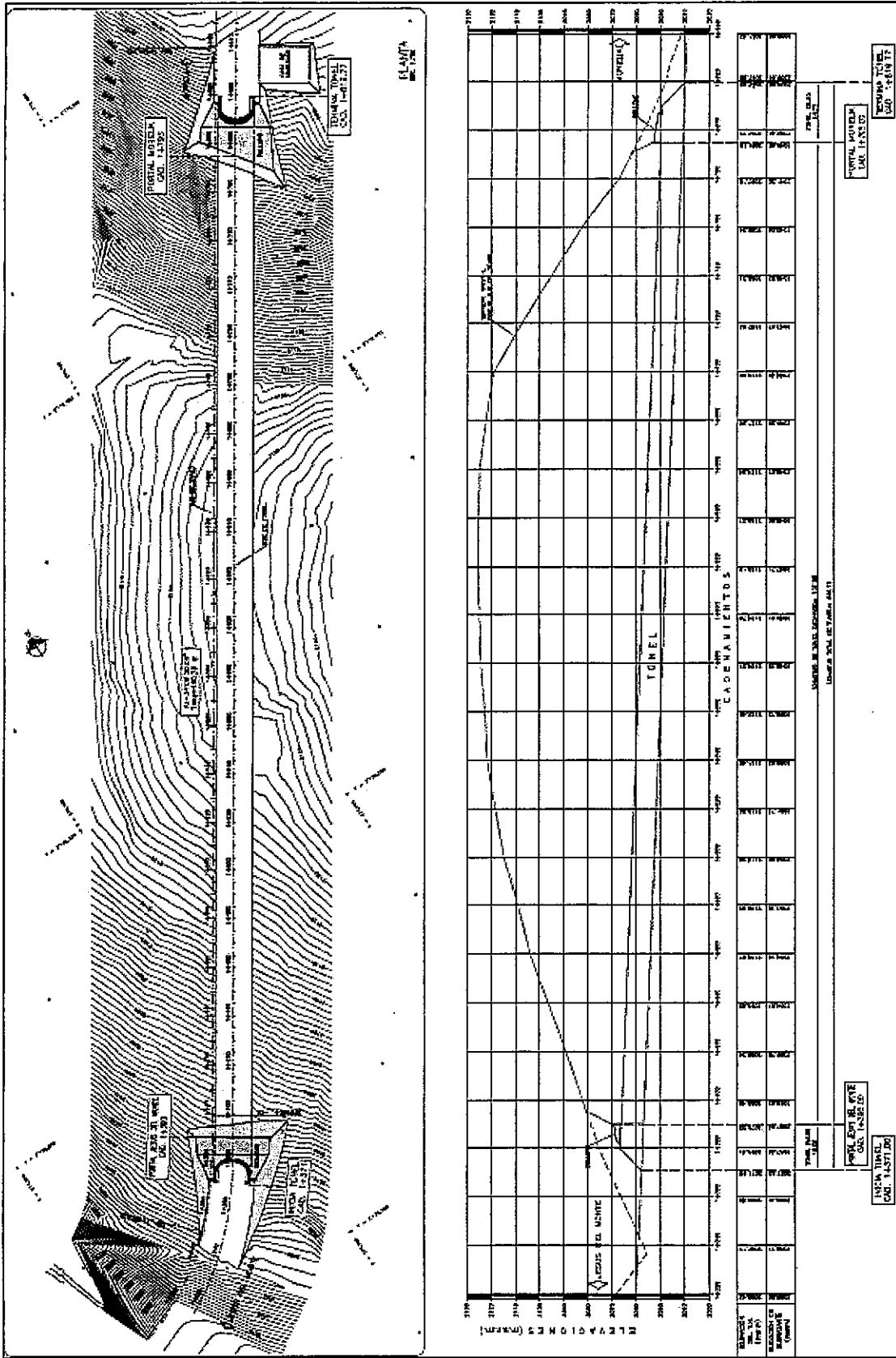


Figura 5.4.2 Planta topográfica y perfil longitudinal del Túnel I (Consultec, 2011)

**5.4.1 Condiciones geológicas**

En este apartado se presenta una breve descripción de la información geológica utilizada para realizar el análisis geológico, los tipos de roca, la zonificación geosísmica y las estructuras geológicas que se presentan en el Túnel I.

**a) Información geológica utilizada**

*a.1) Estudios previos*

- Estudio geotécnico del camino (LACM, 2009)

En este estudio solamente se efectuaron tres sondeos exploratorios en diámetro NX, pero no se realizaron secciones geológicas integrando esta información.

De cada sondeo se presenta el perfil estratigráfico con la descripción litológica, porcentajes de recuperación y RQD.

- Proyecto ejecutivo del túnel I ( Consultec, 2011)

En el túnel I se llevaron a cabo diversos estudios geológicos dentro del proyecto ejecutivo realizado por la empresa Consultec en el año 2011, que incluye la siguiente información:

- Levantamiento geológico superficial de una franja de 100 m, a lo largo de la traza del túnel.
- Cuatro tendidos sísmicos, dos en cada portal y de 60 m de longitud (T1 a T4).
- Seis sondeos eléctricos verticales a lo largo del eje del túnel (SEV-1 a SEV-6).
- Cinco sondeos exploratorios sobre el eje del túnel, en diámetro AW. Se incluyen perfiles estratigráficos y fotografías de núcleos.

SONDEOS EXPLORATORIOS			
SONDEO	CADENAMIENTO	INCLINACIÓN	PROFUNDIDAD (m)
S-1	1+420	VERTICAL	35.0
S-2	1+480	VERTICAL	60.0
S-3	1+690	VERTICAL	70.0
S-4	1+740	VERTICAL	22.5
S-5	1+780	VERTICAL	30.0

- Integración y elaboración de tres planos geológico - geotécnicos:
  - Plano 4. Planta y perfil geológico (Figura 5.4.3)
  - Plano 5. Exploración geofísica (Figura 5.4.4)
  - Plano 6. Planta y perfil geotécnico (Figura 5.4.5)

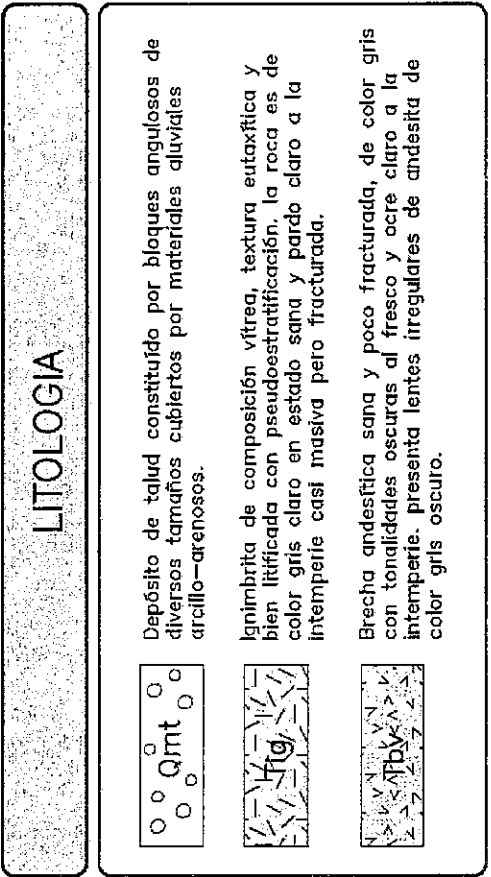
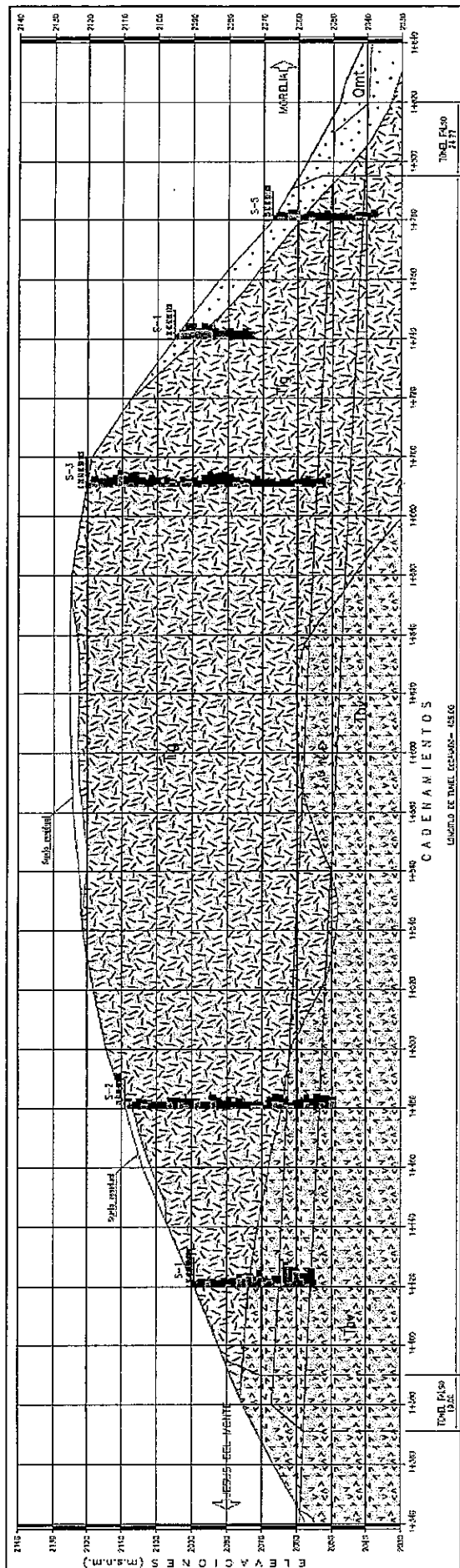


Figura 5.4.3 Perfil geológico Túnel I (Consultec, 2011)

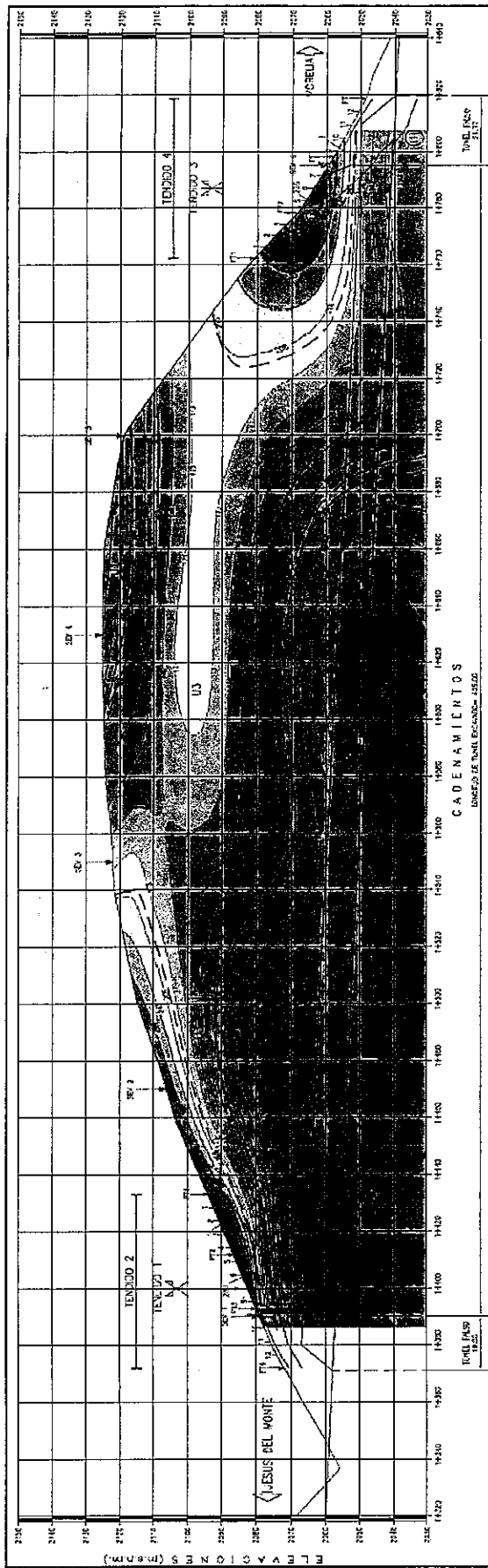


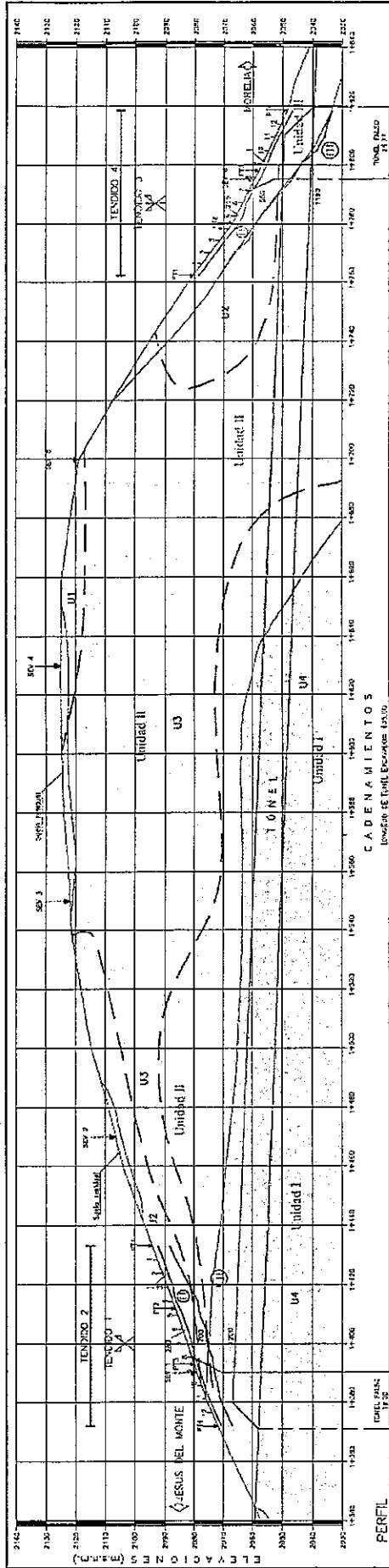
TABLA DE UNIDADES GEOELECTRICAS

UNIDAD	RESISTIVIDAD ohm-m	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
U1	< 80	2.0-6.1	Cobertura superficial de suelo
U2	> 200	1.0-6.5	Brecha andesítica, ignimbrita e material de talud suelto
U3	80-200	1.2-Indef	Ignimbrita
U4	< 80	Indefinido	Brecha andesítica

TABLA DE UNIDADES GEOSISMICAS

UNIDAD	VELOCIDAD m/seg	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
I	255-290	0.7-2.9	Suelo y/o material de talud muy suelto
[I]	510-700	3.6-15.8	Brecha andesítica e material de talud suelto
[II]	1100-1200	Indefinido	Brecha andesítica e ignimbrita compacta

Figura 5.4.4 Perfil geofísico Túnel I (Consultec, 2011)



Condición Geotécnica	Cota e tab. abito	E Empujamiento	D <sup>(1)</sup>	D <sup>(2)</sup>	D <sup>(3)</sup>	C <sup>(1)</sup>	C <sup>(2)</sup>	C <sup>(3)</sup>	D <sup>(4)</sup>	D <sup>(5)</sup>	C <sup>(4)</sup>	C <sup>(5)</sup>	Cota e tab. abito
	1520	30.00	100.00	14100	14100				14300	14300			14177
	15310	14250	14100	14100	14100	14450	14450	14450	14570	14570	14450	14450	14577
			51.00	14570	14570	14450	14450	14450	14720	14720	14450	14450	14727
			70.00	14720	14720	14450	14450	14450	14880	14880	14450	14450	14887
			81.00	14880	14880	14450	14450	14450	14980	14980	14450	14450	14987
			91.00	14980	14980	14450	14450	14450	15080	15080	14450	14450	15087
			101.00	15080	15080	14450	14450	14450	15180	15180	14450	14450	15187

UNIDADES GEOTÉCNICAS		CONDICIONES GEOTÉCNICAS		DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS
CONDICIÓN GEOTÉCNICA	RMR (Blenowski, 1989)	Q (Barton et al., 1974)		
Unidad I	≥ 81 Roca muy buena	≥ 45 Roca muy buena	Arceas puntuales de fricción e=1" y L=6m y concreto lanzado con fibras de acero e=50cm de f'c=300kg/cm <sup>2</sup> (totalidad)	
Unidad II	61 a 80 Roca buena	6 a 45 Roca regular a buena	Arceas puntuales de fricción e=1" y L=6m y concreto lanzado con fibras de acero e=50cm de f'c=300kg/cm <sup>2</sup>	
Unidad III	51 a 60 Roca regular a buena	4 a 5 Roca mala a regular	Arceas de fricción e=1" y L=6m en patón 2.5x2.5m al tresbolillo y concreto lanzado con fibras de acero e=10cm de f'c=300kg/cm <sup>2</sup>	
	41 a 50 Roca regular	1 a 4 Roca mala	Arceas de fricción e=1" y L=6m en patón 2.5x2.5m al tresbolillo y concreto lanzado con fibras de acero e=10cm de f'c=300kg/cm <sup>2</sup>	
	31 a 40 Roca mala a regular	0.4 a 1.0 Roca muy mala	Marcas metálicas Ø1.5m con concreto lanzado con fibras de acero e=15cm de f'c=300kg/cm <sup>2</sup>	
	21 a 30 Roca mala a muy mala	0.1 a 0.4 Roca muy mala a extremadamente mala	Marcas metálicas Ø1.5m con concreto lanzado con fibras de acero e=20cm de f'c=300kg/cm <sup>2</sup>	
	≤ 20 Roca muy mala (empujamiento)	0.01 a 0.10 Roca extremadamente mala	Enfilaje con tubo de acero ø=4" y L=12.0m, a cada 0.4m. Concreto lanzado con fibras e=20cm f'c=300 kg/cm <sup>2</sup>	

Figura 5.4.5 Perfil geotécnico Túnel I (Consultec, 2011)

En resumen, de acuerdo al modelo geológico que se presenta en la sección geológica y geofísica (figuras 5.4.3 y 5.4.4), las rocas que se presentarán al nivel del túnel tienen las siguientes características:

- Del km 1+371 al 1+510 y del km 1+570 al 1+650, se presentará la unidad de brechas volcánicas andesíticas (**Tbv**); que son rocas sanas, poco fracturadas con lentes irregulares de andesita, con dos sistemas de fracturas principales; la matriz areno-arcillosa-limosa es deleznable en presencia de agua y falta de confinamiento.

En los sondeos se tuvieron recuperaciones promedio de 42% y un RQD de 15%, (considerando que se hicieron con diámetro IAX y se tomaron tramos de 6.4 cm en vez de los 10 cm).

Esta unidad presenta valores de resistividad menores de 80 ohm-m; y en el portal de entrada se registraron valores de velocidad del orden de 1,200 m/s, donde la califican como roca compacta.

- Del 1+510 al 1+570 y del km 1+650 al 1+819, se encontrara la unidad de ignimbrita (**Tig**), bien litificada con pseudoestratificación y fracturada, con 4 familias principales y dos secundarias, presenta intercalaciones de horizontes de arena pumítica poco compactos y deleznales de 15 a 50 cm.

En los sondeos se tuvieron recuperaciones promedio de 31% y un RQD de 7%.

Esta unidad presenta valores de resistividad entre 80 y 200 ohm-m; y en el portal de entrada se registraron valores de velocidad del orden de 1,150 m/s, donde la califican como roca compacta.

El contacto entre las dos unidades litológicas se presenta muy cercano al túnel; ya que en la mayor parte de los tramos donde se encontrarán las brechas volcánicas el contacto está a solamente 2 a 10 m por encima de la clave.

- El perfil geotécnico (figura 5.4.5) muestra la presencia de tres unidades geotécnicas:

Unidad I. Brecha andesítica, del km 1+371 al 1+650

Unidad II. Ignimbrita, del 1+650 al 1+790

Unidad III. Deposito de talud, del 1+790 al 1+819

Se establecieron a lo largo del túnel diversas condiciones geotécnicas con su clasificación de Barton y Bieniawski, con sus recomendaciones de tratamientos.



### a.2) Estudios realizados por la UNAM

- Se realizó un reconocimiento geológico superficial de la zona del túnel.
- Se efectuó un tendido sísmico de 120 m de longitud en la zona del portal de salida para poder corroborar y complementar la información sísmica en esa zona. En el capítulo 4.1 de este informe se presentan los resultados de estudio geofísico.
- Integración de la información geológica y geofísica de los estudios anteriores con lo realizado en este trabajo.

### b) Tipos de rocas

Como resultado de la integración de la información geológica superficial y de los diversos estudios geofísicos y sondeos exploratorios, se elaboró un nuevo modelo geológico-geotécnico del Túnel I.

En la zona del túnel afloran las tres unidades litológicas de la secuencia volcánica riolítica de la Formación "Cantera Morelia", que cubren a las rocas de la secuencia andesítica "Mil Cimbres", quedando este contacto por debajo de la rasante del túnel.

La distribución superficial de estas unidades litológicas se presenta en la figura 5.4.7 y en el Plano 5.1, mostrándose tanto en planta en un mapa geológico de una franja del túnel, como a lo largo de una sección geológica por el eje de la excavación.

En la figura 5.4.6 se presenta un cuadro resumen de las unidades litológicas que se podrán encontrarse en la zona del Túnel I; mientras que su distribución en el subsuelo se ilustra en la sección geológica de la figura 5.4.7 y en el Plano 5.1

Sin embargo, el túnel se excavara básicamente en dos unidades litológicas: conglomerados e ignimbritas, que presentan la siguiente distribución y características:

- Del km 1+371 al 1+650 se presentará la unidad de conglomerados de composición riolítica (TM cg); que es una roca conformada por fragmentos de rocas riolíticas, de forma subredondeada a subangulosa, empacadas en una matriz areno-arcillosa; presenta una estructura masiva con escasas fracturas, con dos familias principales de inclinación subvertical.
- Del km 1+371 al 1+650 se presentará la unidad de ignimbritas de composición riolítica (TM ig); que es una roca compacta, consistente y fracturada, con cuatro familias principales.

UNIDADES LITOLÓGICAS






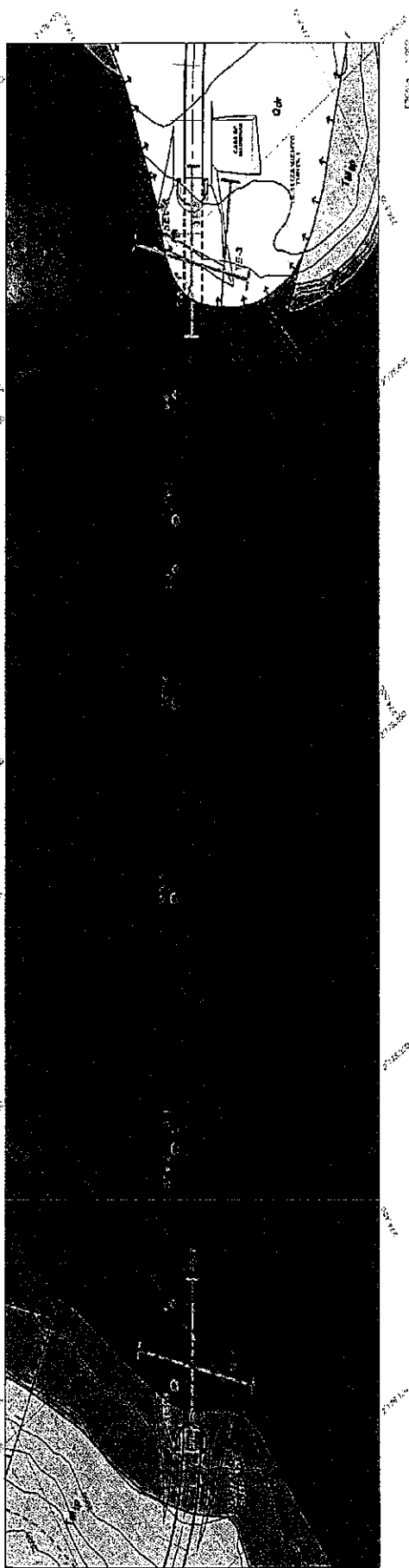
EDAD	FORMACIÓN GEOLÓGICA	UNIDAD LITOLÓGICA	LITOLOGÍA
CUATERNARIO		$Q_{dr}$	 DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTOS
MIOCENO	SECUENCIA RIOLÍTICA CANTERA MORELIA	$T_{M_{ig}}$	 IGNIMBRITAS
		$T_{M_{cg}}$	 CONGLOMERADOS Y BRECHAS
		$T_{M_{tp}}$	 TOBAS PUMITICAS
	SECUENCIA ANDESÍTICA MIL CUMBRES	$T_{M_{bv-an}}$	 BRECHAS VOLCÁNICAS, TOBAS Y DERRAMES ANDESÍTICOS

Fig. 5.4.6 Unidades litológicas del Túnel I



MAPA GEOLÓGICO



SECCIÓN GEOLÓGICA

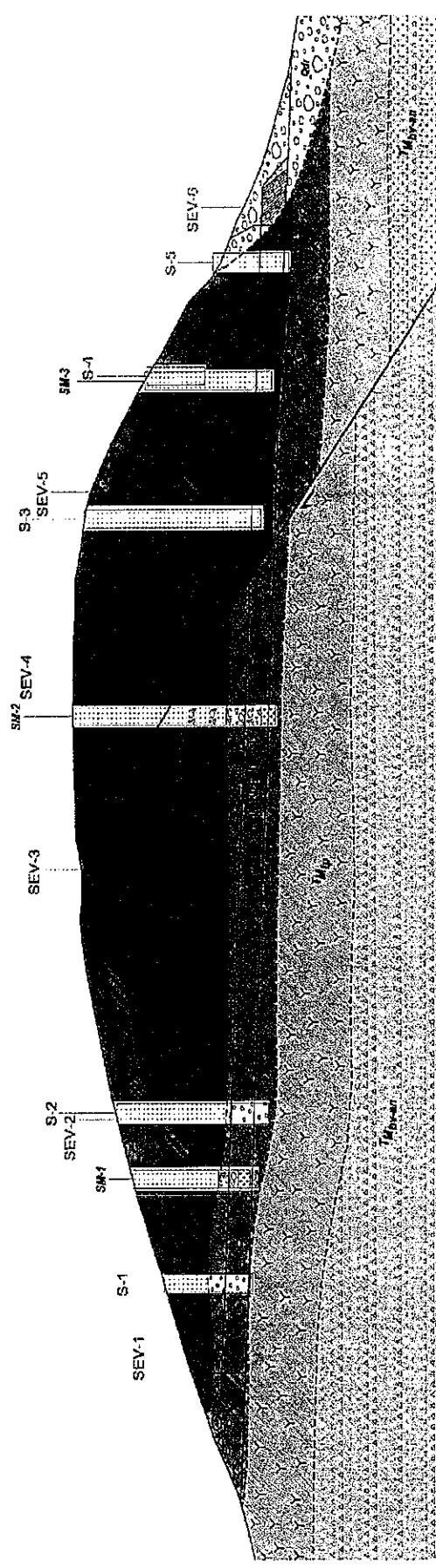


Figura 5.4.7 Planta y sección geológica Túnel I (ver plano 5.1)

### **b) Estructuras geológicas**

En la zona del túnel se presentan dos estructuras geológicas importantes, la primera relacionada con la posible presencia de una falla geológica atravesando el túnel, y la segunda con la existencia de un antiguo deslizamiento localizado inmediatamente a la salida del túnel.

En los capítulos 3.2.2 y 3.2.3 de este informe se presenta una mayor descripción de la falla y deslizamiento.

- **Falla Altozano**

Como resultado del levantamiento geológico superficial y de la interpretación de las fotografías aéreas e imágenes satelitales, así como del análisis detallado de los núcleos de los sondeos realizados y del estudio geoelectrico, se llegó a la conclusión que el Túnel I será atravesado por una falla geológica.

La falla fue denominada Falla Altozano, es de tipo normal con el bloque caído hacia el norte y mantiene una orientación general E-W y se estima una inclinación entre 70° y 80°.

La ubicación de la falla se estableció con base a los lineamientos observados en las fotos e imágenes, así como por la presencia de un fuerte escarpe del terreno en la zona de salida del túnel y que se considera también sirvió como límite derecho del deslizamiento existente en ese tramo.

En la zona del túnel la ubicación de la falla se basó en el análisis de los ocho sondeos existentes y la información geoelectrica, en donde se observó la falta de continuidad lateral que debía mantener el horizonte conglomerático en el tramo del km 1+620 al 1+680, por lo que se deduce que en este tramo cruzará la falla durante la excavación del túnel.

- **Deslizamiento salida Túnel I**

En la zona de salida del túnel I se presenta una amplia planicie con material producto de un antiguo deslizamiento que movilizó una gran masa de roca de las unidades de ignimbrita y conglomerados riolíticos, ubicadas en la parte alta del cerro y que se desplazaron hacia el oriente hasta cubrir al río Chiquito.

Se ha planteado que este deslizamiento fue provocado por la presencia de las tobas arenosas pumíticas que se encuentran en la base del deslizamiento, que son materiales deleznales y de baja resistencia, y limitado lateralmente por la Falla Altozano y probablemente por la zona de fractura río Chiquito.

Sin embargo, aunque el deslizamiento queda relativamente fuera de la zona del túnel y no representa un problema actual para su construcción, es necesario tener en cuenta que las condiciones geológicas siguen siendo muy similares a las que propiciaron el deslizamiento.

**5.4.2 Condiciones geotécnicas**

*a) Unidades geotécnicas*

Con el apoyo de la información del subsuelo de los 8 sondeos exploratorios y los estudios geofísicos de refracción sísmica y resistividad, fue posible efectuar una zonificación geotécnica de los materiales que se podrán encontrar durante la excavación del túnel.

En la figura 5.4.8 se presenta un cuadro resumen de las unidades geotécnicas que se podrán encontrarse en la zona del Túnel I; mientras que su distribución en el subsuelo se ilustra en la sección geotécnica del Plano 5.4 y figura 5.4.9.

UNIDADES GEOTÉCNICAS

UNIDAD GEOTÉCNICA	VELOCIDAD SÍSMICA m/s	DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA
$Q_{d-f}$	200-560	DEPÓSITOS DE DESLIZAMIENTOS POCO CONSOLIDADOS
$TMig-a$	280-700	IGNIMBRITA MUY INTEMPERIZADA, POCO CONSISTENTE Y MUY FRACTURADA.
$TMig-b$	1,150-1,200	IGNIMBRITA MODERADAMENTE INTEMPERIZADA, CONSISTENTE Y FRACTURADA.
$TMig-c$	>1,200	IGNIMBRITA SANA, MUY CONSISTENTE Y MEDIANAMENTE FRACTURADA.
$TMcg-a$	620-700	CONGLOMERADO MUY INTEMPERIZADO Y POCO CONSISTENTE Y MUY FRACTURADO.
$TMcg-b$	1,100-1,200	CONGLOMERADO INTEMPERIZADO, CONSISTENTE Y FRACTURADO.
$TMcg-c$	>2,000	CONGLOMERADO SANO, CONSISTENTE Y POCO FRACTURADO.
$TMtp$	-	TOBA PUMÍTICA
$TM_{bv-an}$	-	BRECHAS VOLCÁNICAS Y ANDESITAS

Figura 5.4.8 Unidades geotécnicas Túnel I



SECCIÓN GEOTÉCNICA A-A

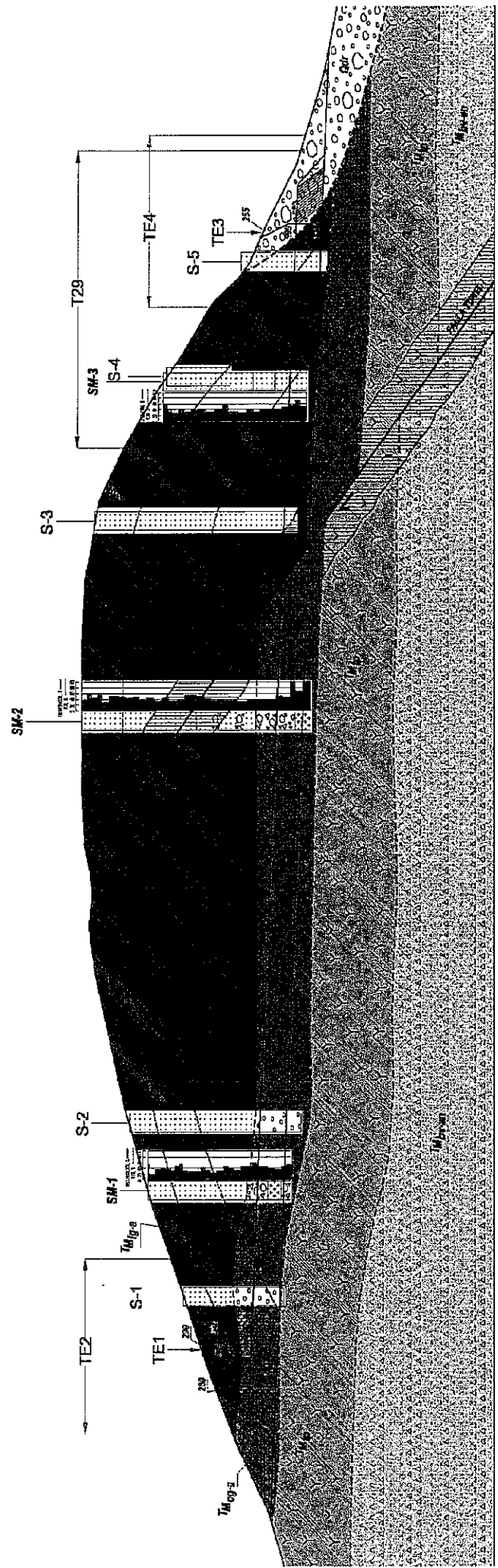


Figura 5.4.9 Sección geotécnica Túnel I (ver plano 5.2)

b) *Análisis geotécnico*

Las unidades litológicas determinadas en el presente trabajo difieren bastante de las del proyecto (Figura 5.4.5 Consultec y 5.4.9 UNAM).

En la parte central del túnel se atravesara la denominada Falla Altozano, con una dirección E-W, que cortara de manera diagonal a la obra en una longitud aproximada de 80 m; la cual no fue detectada en el proyecto.

Por esta razón, la descripción y ubicación de las distintas Condiciones Geotécnicas que se muestra en el diseño del túnel son incorrectas.

En la información que fue entregada para revisión del proyecto no se encontró ninguna relacionada con la determinación de los parámetros empleados para la caracterización geotécnica del macizo rocoso de Calidad Q y Calidad RMR, así como de cada una de las Condiciones Geotécnicas que se presentan en el perfil del túnel.

Tampoco se presentaron los datos de laboratorio específicamente relacionados con la resistencia a la compresión uniaxial o triaxial que con frecuencia se efectúan para este tipo de estudio y diseño geotécnico.

En los registros de los sondeos S-1 a S-5, se reportan algunos datos de la resistencia a la compresión uniaxial de núcleos, específicamente 17 datos, de los cuales 8 corresponden al sondeo S-1, 4 al sondeo S-2, 3 al S-3 y 2 al sondeo S-4, se considera que son muy pocos datos de laboratorio y poco representativo para la caracterización geomecánica del macizo rocoso a lo largo del túnel.

Con excepción de las zona de la entrada del túnel (del lado Jesús del Monte), con Condición Geotécnica "E", la zonificación del resto del túnel deberá ser revisada poniendo especial atención a la nueva litología determinada en este estudio y a las unidades geotécnicas TM cg y TM ig , así como la zona de Falla Altozano, las cuales se muestran en la figura 5.4.9 y en el plano 5.2.

Los tratamientos proyectados para la estabilidad temporal y a largo plazo del portal de entrada del túnel (del lado Jesús del Monte), se deberá revisar considerando la unidad litológica tipo conglomerado riolítico determinada en este estudio.

La pendiente de los cortes y los tratamientos proyectados para la estabilidad de la excavación del portal de salida (del lado Morelia) se consideran inadecuados, dado que se trata de materiales granulares poco consolidados del depósito de deslizamiento antiguo.

## 5.5 TUNEL II

El Túnel II se ubica en el tramo final del camino, antes de la llegada a la ciudad de Morelia.

A continuación se presenta una breve descripción de las características geométricas del corte y posteriormente se describen las condiciones geológicas y geotécnicas.

### Características geométricas

Las características geométricas del túnel fueron tomadas del proyecto de ejecutivo elaborado por Consultec. En la figura 5.5.1 se muestra la geometría del túnel y en la figura 5.5.2 se presenta la planta topográfica y el perfil longitudinal a lo largo del túnel.

- Tramo: 3+471 a 4+204
- Longitud : 773 m
- Pendiente: 4.03%
- Ancho de corona : 12 m
- Altura túnel : 8.42 m

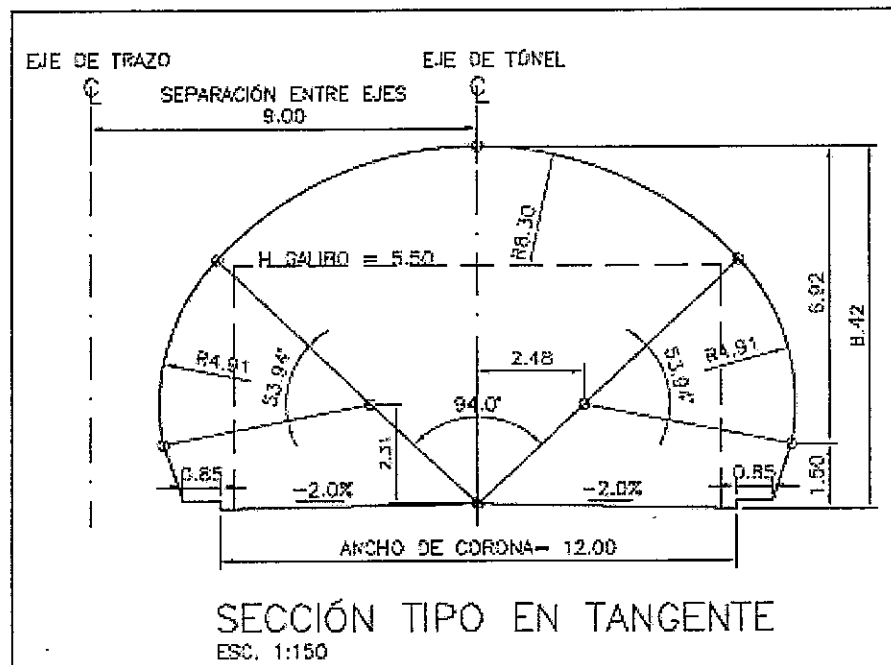


Figura 5.5.1 Sección tipo del túnel (Consultec, 2011)



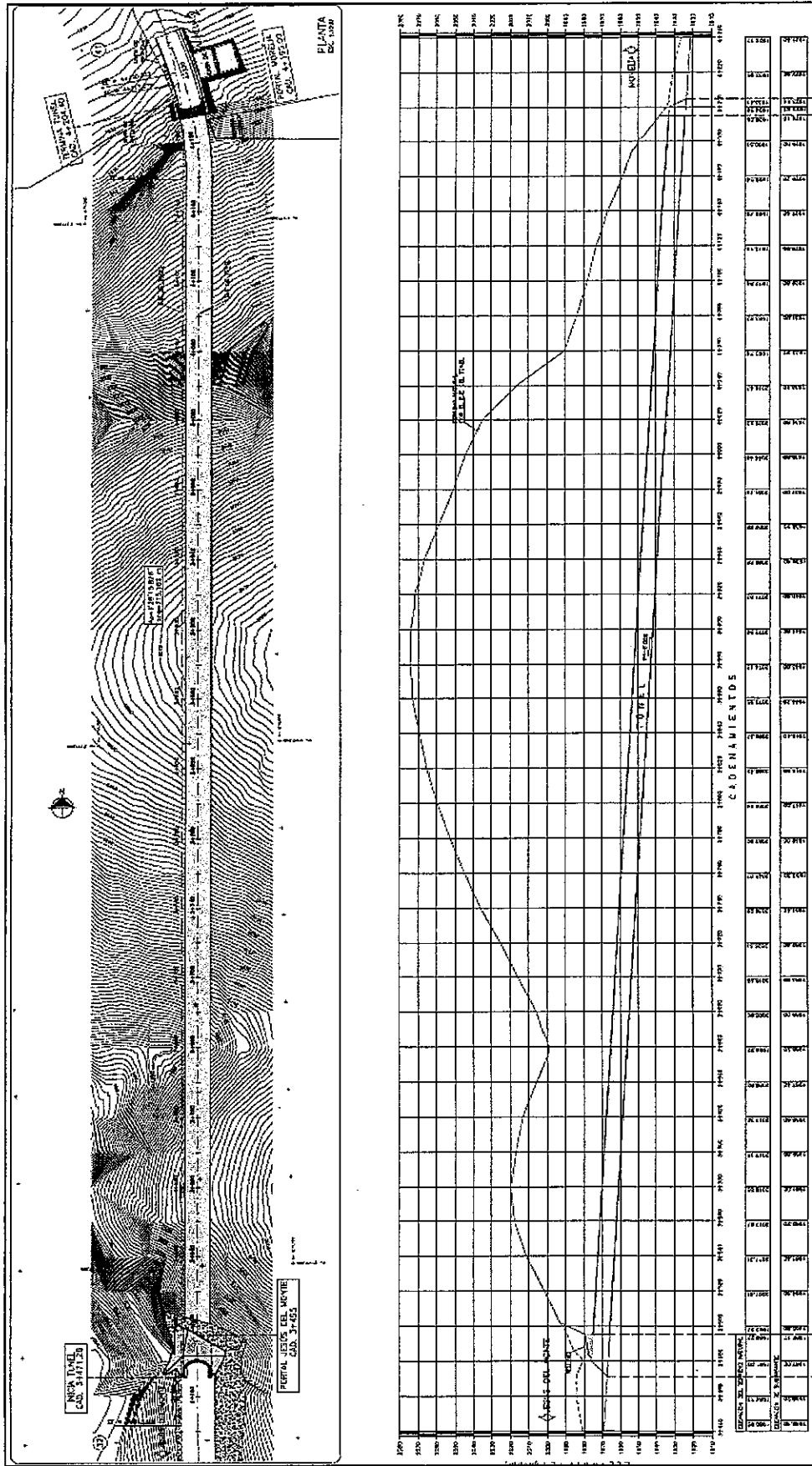


Figura 5.5.2 Planta topográfica y perfil longitudinal del Túnel II (Consultec, 2011)

### 5.5.1 Condiciones geológicas

En este apartado se presenta una breve descripción de la información geológica utilizada para realizar el análisis geológico, los tipos de roca, la zonificación geosísmica y las estructuras geológicas que se presentan en el Túnel II.

#### c) Información geológica utilizada

##### a.1) Estudios previos

- Estudio geotécnico del camino (LACM, 2009)

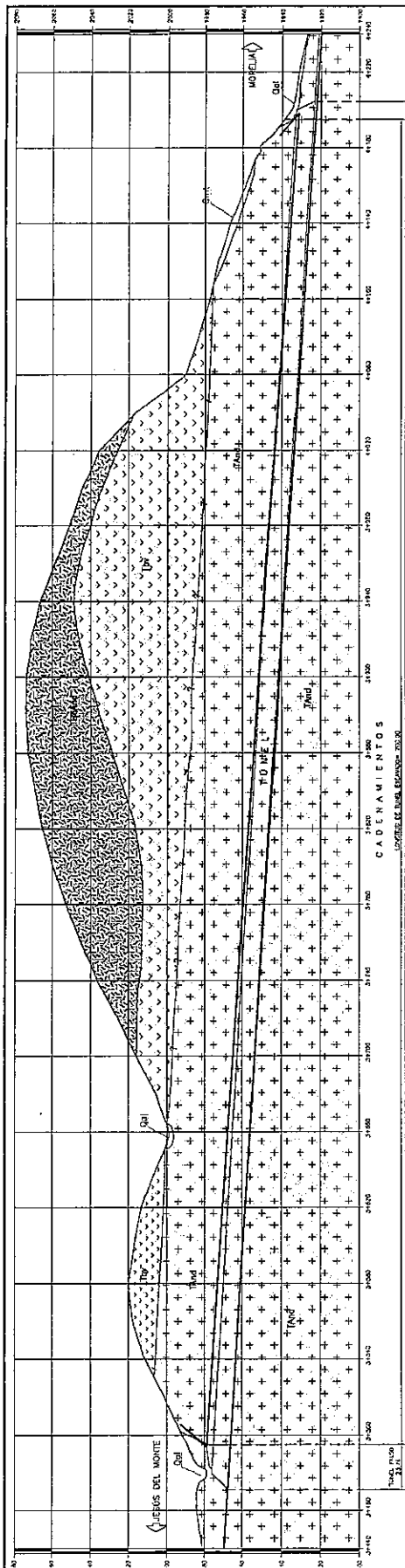
En este estudio solamente se efectuaron tres sondeos exploratorios en diámetro NX, pero no se realizaron secciones geológicas integrando esta información.

De cada sondeo se presenta el perfil estratigráfico con la descripción litológica, porcentajes de recuperación y RQD.

- Proyecto ejecutivo del túnel II ( Consultec, 2011)

En el túnel II se llevaron a cabo diversos estudios geológicos dentro del proyecto ejecutivo realizado por la empresa Consultec en el año 2011, que incluye la siguiente información:

- Levantamiento geológico superficial de una franja de 100 m, a lo largo de la traza del túnel.
- Cuatro tendidos sísmicos, dos en cada portal y de 60 m de longitud (T5 a T8).
- Diez sondeos eléctricos verticales a lo largo del eje del túnel (SEV-7 a SEV-16).
- No se efectuaron sondeos exploratorios.
- Integración y elaboración de tres planos geológico - geotécnicos:
  - Plano 4. Planta y perfil geológico (Figura 5.5.3)
  - Plano 5. Exploración geofísica (Figura 5.5.4)
  - Plano 6. Perfil geotécnico (Figura 5.5.5)



**LITOLOGIA**

Qmt	Depósito de talud constituido por bloques angulosos de diversos tamaños cubiertos por materiales aluviales arcillo-arenosos.
Qal	Depósitos Aluviales color pardo claro, de composición arcillo-limoza y de consistencia blanda.
TBqAnd	Andesita de textura afanítica vesicular y de color gris oscuro al fresco y gris oscuro con tonalidades pardo oscuro a la intemperie.
Tby	Bracha Andesítica sana y poco fracturada, de color gris con tonalidades oscuras al fresco y ocre claro a la intemperie. Presenta lentes irregulares de andesita de color gris oscuro.
+ TAnd	Andesita de textura afanítica, de color gris oscuro al fresco y a la intemperie.

Figura 5.5.3 Perfil geológico Túnel II (Consultec, 2011)

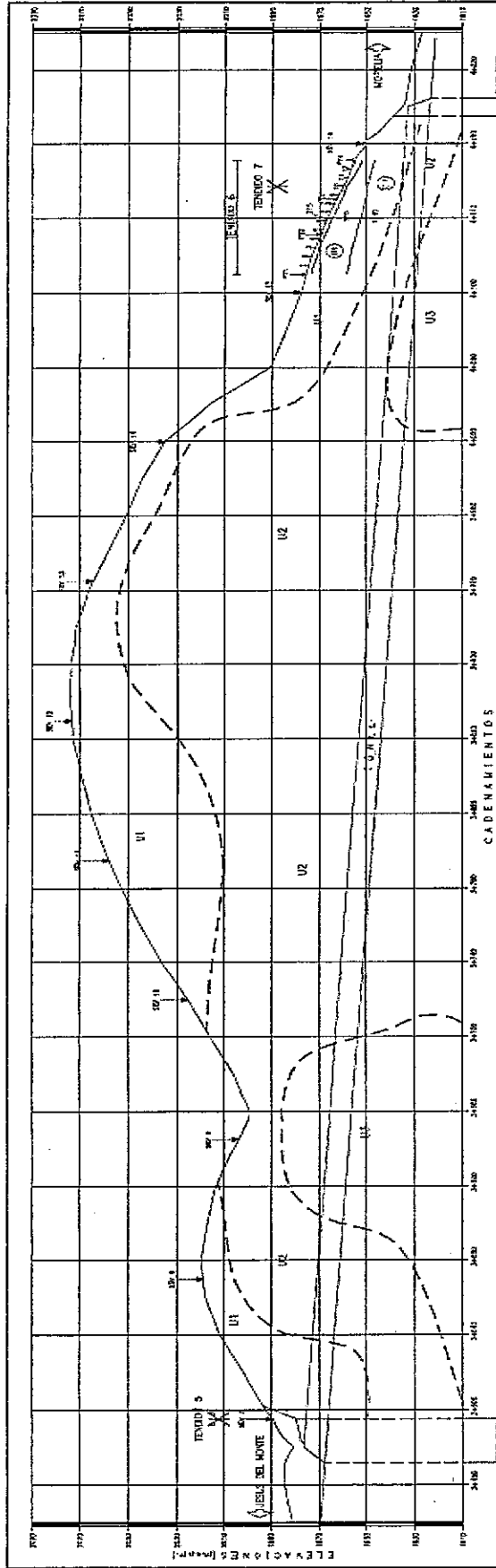


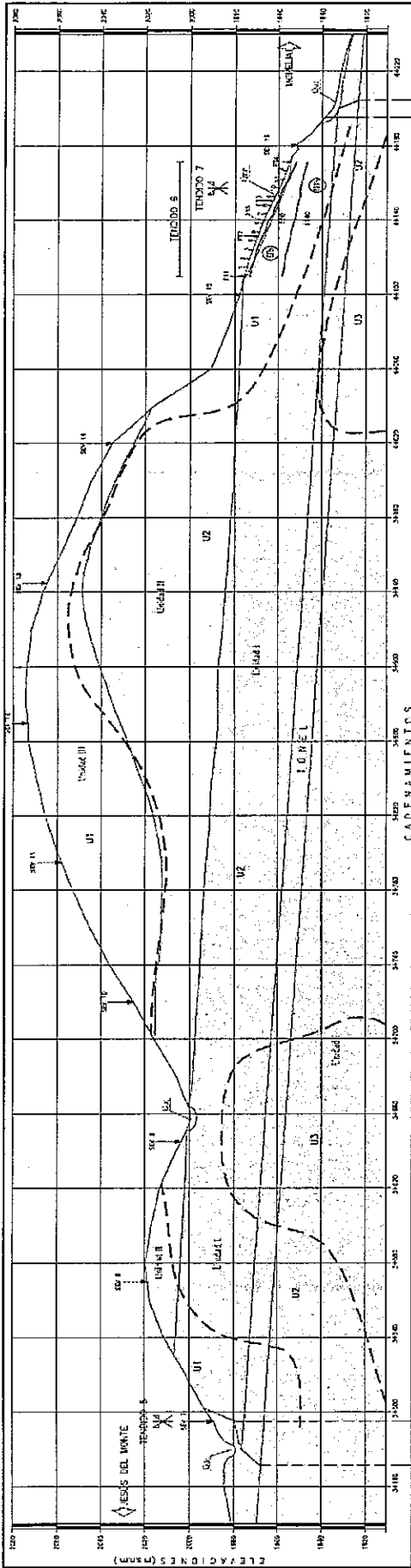
TABLA DE UNIDADES GEOELECTRICAS

UNIDAD	RESISTIVIDAD ohm-m	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
U1	< 50	8.5-47.5	Suelo, material de talud y/o roca ignea alterada
U2	50-100	17.0-Indef	Roca ignea poco alterada
U3	> 100	Indefinito	Roca ignea sana

TABLA DE UNIDADES GEOSISMICAS

UNIDAD	VELOCIDAD m/seg	ESPESOR (m)	MATERIAL ASOCIADO
I	205-260	0.4-2.3	Suelo y/o material de talud muy suelto
Ila	1250	1.9-4.6	Roca ignea extrusiva compacta
Illb	495-560	6.2-15.7	Material de talud y/o roca ignea extrusiva alterada suelta
IIla	2200	Indefinito	Roca ignea extrusiva sana muy compacta
IIlb	1140-1185	Indefinito	Roca ignea extrusiva compacta

Figura 5.5.4 Perfil geofísico Túnel II (Consultec, 2011)



Condición Geotécnica	C <sup>H</sup>	C <sup>N</sup>		C <sup>H</sup>	D <sup>M</sup>	D <sup>M</sup>	R <sup>H</sup>		
		200	400				1.5	1.5	
2100		4000		4400		4400		4400	
2000		4000		4400		4400		4400	
1900		4000		4400		4400		4400	

CONDICIÓN GEOTÉCNICA	CONDICIONES GEOTÉCNICAS		DESCRIPCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS
	RMR (Bieniowski, 1989)	Q (Barton et al., 1974)	
A	≥ 81 Roca muy buena	≥ 45 Roca muy buena	Arco puntual de filición $\phi=1"$ y $L=6m$ y concreto lanzado con fibras de acero $\phi=5cm$ de $f_c=300kg/cm^2$ (ocasional)
B	61 a 80 Roca buena	6 a 15 Roca regular a buena	Arco puntual de filición $\phi=1"$ y $L=6m$ y concreto lanzado con fibras de acero $\phi=5cm$ de $f_c=300kg/cm^2$
C <sup>(+)</sup>	51 a 60 Roca regular a buena	4 a 6 Roca mala a regular	Arco de filición $\phi=1"$ y $L=6m$ en patón 2.5x2.5m al traballito y concreto lanzado con fibras de acero $\phi=1.0cm$ de $f_c=300kg/cm^2$
C <sup>(-)</sup>	41 a 50 Roca regular	1 a 4 Roca mala	Arco de filición $\phi=1"$ y $L=6m$ en patón 2.0x2.0m al traballito y concreto lanzado con fibras de acero $\phi=1.0cm$ de $f_c=300kg/cm^2$
D <sup>(+)</sup>	31 a 40 Roca mala a regular	0.4 a 1.0 Roca muy mala	Arco metálico $\phi=1.0m$ con concreto lanzado con fibras de acero $\phi=20cm$ de $f_c=300kg/cm^2$
D <sup>(-)</sup>	21 a 30 Roca mala a muy mala	0.1 a 0.4 Roca muy mala a extremadamente mala	Arco metálico $\phi=1.0m$ con concreto lanzado con fibras de acero $\phi=20cm$ de $f_c=300kg/cm^2$
E	≤ 20 Roca muy mala	0.01 a 0.1 Roca extremadamente mala	Enfilaje con tubo de acero $\phi=4"$ y $L=12.0m$ , a cada 0.4m. Concreto lanzado con fibras $\phi=20cm$ $f_c=300 kg/cm^2$

Figura 5.5.5 Perfil geotécnico del Túnel II (Consultec, 2011)

En resumen, de acuerdo la información que se presenta en el informe geológico y en el perfil geológico, geofísico y geotécnico, las condiciones que se encontraran al nivel del túnel tienen las siguientes características:

- La unidad litológica que se presentara a todo el túnel (km3+471 al 4+204) será la andesita (TAnd); esta unidad es descrita como una roca masiva, muy densa, color gris oscuro, textura afanítica, sana y fracturada.; esta unidad subyace a brechas volcánicas, cuyo contacto se encuentra entre 33 y 37 m por encima del túnel, por lo que estas rocas no tendrán influencia en el comportamiento tenso de formacional del mismo, quedando dominado por las características de las andesitas.
- El estudio geoelectrico indico la presencia de tres unidades geoelectricas a lo largo del túnel:
  - La mayor parte del túnel se realizaría en la unidad U2 (50 a 100 ohm/m) asociada a una roca ígnea poco alterada;
  - Solamente en pequeños tramos de la parte inicial y final se ubican en la unidad U3 (>100 ohm/m), de roca ígnea sana.
  - En la zona de los portales se encuentra la unidad U1(<50 ohm/m) de suelos, material de talud y roca alterada
- El estudio geosísmico realizado en la zona del portal de salida, indico que en los últimos 200 m del túnel se encontraran rocas ígneas compactas con velocidades de 1,140 m/s (Unidad III b); sin embargo, 10 m por arriba de la clave, se presentan de materiales de talud o roca alterada suelta con velocidades bajas de 560 m/s (Unidad IIb).
- El perfil geotécnico indica que el túnel se excavara en su totalidad en la Unidad Geotécnica I; asociada a basaltos andesíticos vesiculares, sanos, fracturados, masivos y densos.

Se establecieron a lo largo del túnel siete condiciones geotécnicas, basadas en la zonificación geofísica, donde se efectuaron clasificaciones de Barton y Bieniawski, y se recomendaron tratamientos de estabilización de la excavación.

### a.2) Estudios realizados por la UNAM

- Se realizó un reconocimiento geológico superficial de la zona del túnel.
- Se efectuó un estudio geofísico con dos métodos de exploración complementarios, el sísmico de refracción y el eléctrico de resistividad; los cuales cubrieron de manera muy completa la parte final del túnel y la zona de del portal de salida Morelia.
  - En la parte final del túnel y portal de salida se realizaron tres tendidos sísmicos longitudinales y cuatro transversales. Mientras que en el área del portal de entrada se realizaron dos tendidos complementarios.
  - Se efectuaron trece sondeos electromagnéticos a lo largo de la traza del túnel y otros sondeos transversales. También se apoyo en una sección geoelectrica paralela al túnel, situada a 100 m al oriente del trazo.
- Se realizó la integración de los resultados de los sondeos exploratorios realizados por LACCAM en 2009 (litología, porcentaje de recuperación e Índice de Calidad de la Roca).
- Se integró la información geológica, geofísica y sondeos elaborando un mapa y sección geológico del túnel II y una sección geotécnica.

### b) Tipos de rocas

Como resultado de la integración de la información geológica superficial y de los diversos estudios geofísicos y sondeos exploratorios, se elaboro un nuevo modelo geológico-geotécnico del túnel II:

#### b.1) Unidades litológicas

- Rocas volcánicas andesíticas (TM bv-an)

Las unidades litológicas que se mayor distribución tienen en la zona del túnel, corresponden básicamente a las rocas volcánicas andesíticas de la "Secuencia Andesítica Mil Cumbres", constituida por derrames andesíticos y brechas volcánicas, las cuales se encuentran intercalados de manera errática e irregular y en proporciones diferentes según su posición estructural, y en menor proporción existen horizontes delgados de tobas arcillosas.

Esta secuencia volcánica se encuentra ligeramente inclinada hacia el noroeste, con un echado de 10 a 20°.

- Rocas volcánicas riolíticas (TM tp)

En la parte alta del cerro que atravesara el túnel se presentan afloramientos de tobas pumíticas pertenecientes a la Formación "Cantera Morelia", sin embargo su distribución se restringe a la parte alta del cerro, por lo que no serán atravesadas por el túnel.

- Depósitos lacustres (Q l)

Después de la salida del túnel y coincidiendo con la parte topográficamente plana se presentan depósitos de tipo lacustre, que están cubiertos parcialmente por los materiales del deslizamiento.

- Depósitos de deslizamientos (Q d)

Hacia la zona del portal de salida se presenta una zona donde se presentan materiales producto de deslizamientos del terreno, que cubren de manera irregular a las rocas andesíticas.

La distribución superficial de estas unidades litológicas se presenta en el Plano 5.1, mostrándose tanto en planta en un mapa geológico de una franja del túnel, como a lo largo de una sección geológica por el eje de la excavación.

#### *b.1) Subunidades litológicas*

Con el apoyo de la información del subsuelo, basada principalmente en los tres sondeos exploratorios y apoyada con los estudios geofísicos, fue posible efectuar una zonificación más detallada de los materiales que se podrán encontrar durante la excavación del túnel, diferenciando a las rocas de la secuencia andesítica en cuatro (4) subunidades litológicas, con en base en el predominio de derrames andesíticos o de brechas volcánicas.

Así mismo, se infiere la presencia de materiales piroclásticos arenosos que podrían presentarse al nivel del túnel en algunos tramos.

En la figura 5.5.6 se presenta un cuadro resumen de las unidades y subunidades litológicas que se podrán encontrarse en la zona del Túnel II; mientras que su distribución en el subsuelo se ilustra en la planta y sección geológica del Plano 5.3 y figura 5.5.7.



UNIDADES LITOLÓGICAS





EDAD	FORMACIÓN GEOLÓGICA	UNIDAD LITOLÓGICA	SUBUNIDAD LITOLÓGICA	TIPO DE MATERIAL	
CUATERNARIO		Q <sub>da</sub>		-	BLOQUES Y MASAS ROCOSAS DESLIZADAS EMPACADAS CON ARCILLAS Y ARENAS
		Q <sub>l</sub>		-	ARCILLAS Y LIMOS
MIOCENO	SECUENCIA RIOLÍTICA	T <sub>Mtp</sub>		-	TOBAS PUMÍTICAS ARENOSAS
	SECUENCIA ANDESÍTICA	T <sub>Mbv-an</sub>		T <sub>Mbv-an</sub> I	BRECHAS VOLCÁNICAS AMARILLAS CON HORIZONTES DELGADOS DE TOBAS ARCILLOSAS Y DERRAMES ANDESÍTICOS
				T <sub>Mbv-an</sub> II	ANDESITAS CON BRECHAS VOLCÁNICAS
				T <sub>Mbv-an</sub> III	BRECHAS VOLCÁNICAS CON ANDESITAS
				T <sub>Mbv-an</sub> IV	ANDESITAS CON BRECHAS VOLCÁNICAS
				T <sub>Mpc</sub>	PIROCLASTOS DE ARENAS Y GRAVAS

Figura 5.5.6 Unidades y subunidades litológicas Túnel II

d) Estructuras geológicas

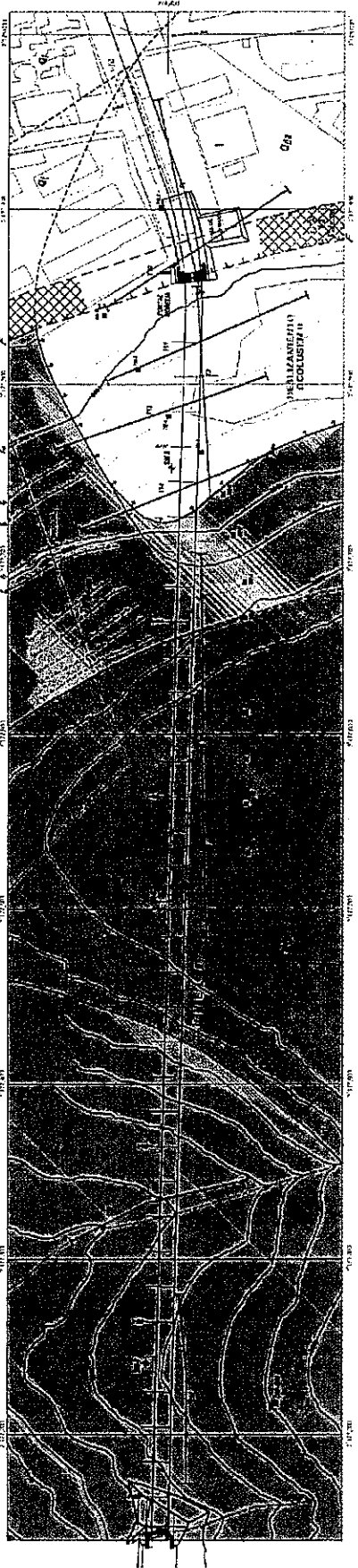
En la zona del túnel no se detectó la presencia de fallas geológicas regionales que la crucen.

Sin embargo, el portal de salida del túnel se encuentra muy cercano a la falla geológica regional "La Paloma".

Por otra parte, el tramo final del túnel y el portal de salida, se encuentran dentro de materiales producto de un antiguo deslizamiento de la ladera.



MAPA GEOLOGICO



SECCION GEOLOGICA

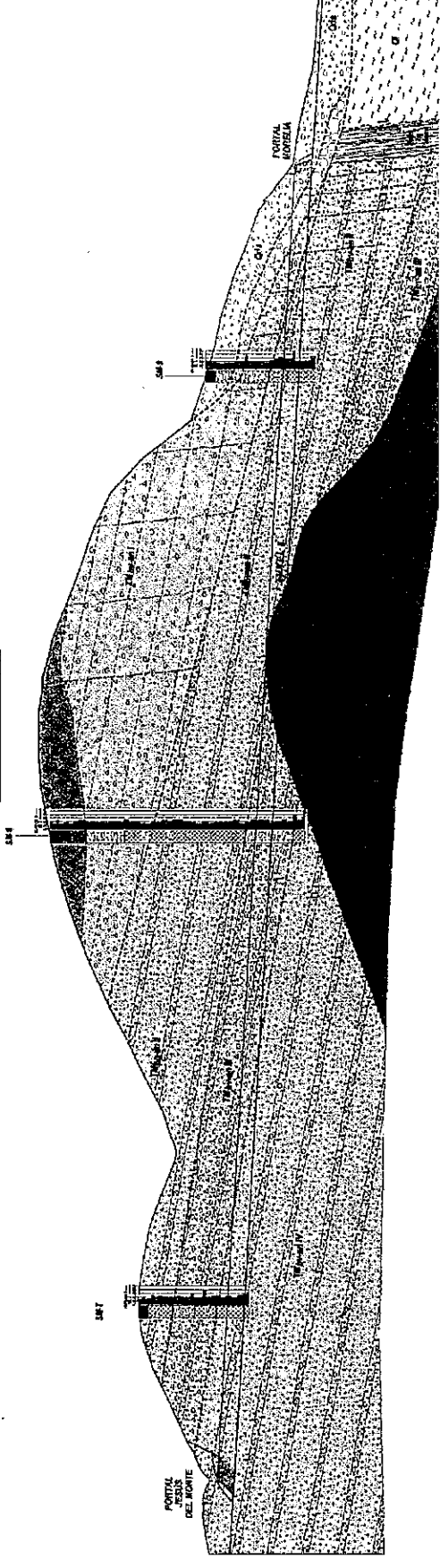


Figura 5.5.7 Planta y sección geológica Túnel II (ver plano 5.3)

### 5.5.2 Condiciones geotécnicas

#### a) Unidades geotécnicas

Con el apoyo de la información del subsuelo de los estudios geofísicos de refracción sísmica y resistividad, fue posible efectuar una zonificación geotécnica de los materiales que se podrán encontrar durante la excavación del túnel.

En la figura 5.5.8 se presenta un cuadro resumen de las unidades y subunidades litológicas que se podrán encontrar en la zona del Túnel II; mientras que su distribución en el subsuelo se ilustra en la sección geotécnica del Plano 5.3 y figura 5.5.9.

UNIDADES GEOTÉCNICAS

UNIDAD GEOTÉCNICA	VELOCIDAD (m/s)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	CONDICIONES DEL MATERIAL
<i>Q<sub>da-a</sub></i>	600-940	5-50	MATERIALES POCO CONSOLIDADOS A SUELTOS EN MATRIZ ARCILLO-ARENOSA.
<i>Q<sub>da-b</sub></i>		30-80	MASAS DE ROCA DESLIZADAS O BOLEOS Y GRAVAS COMPACTAS.
<i>Q<sub>l</sub></i>	1,200-1,420	1-15	SUELOS MEDIANAMENTE CONSOLIDADOS CON ALTO CONTENIDO ARCILLOSO.
<i>T<sub>Mtp</sub></i>	600-900	15-180	ROCA MUY INTEMPERIZADA Y POCO CONSISTENTE.
<i>T<sub>Mbv-an I-a</sub></i>	750-1,200	50-310	ROCA MUY INTEMPERIZADA, MEDIANAMENTE CONSISTENTE, MUY FRACTURADA, CON PLANOS ABIERTOS.
<i>T<sub>Mbv-an I-b</sub></i>	1,350-2,400	210-770	ROCA INTEMPERIZADA, CONSISTENTE, FRACTURADA CON PLANOS ABIERTOS.
<i>T<sub>Mbv-an I-c</sub></i>	2,200-2,800	50-100	ROCA SANA, MUY CONSISTENTE, FRACTURADA, CON PLANOS CERRADOS.
<i>T<sub>Mbv-an II-b</sub></i>	1,300-1,950	-	ROCA INTEMPERIZADA, CONSISTENTE, FRACTURADA CON PLANOS ABIERTOS.
<i>T<sub>Mbv-an II-c</sub></i>	> 2500	100-350	ROCA SANA, MUY CONSISTENTE, FRACTURADA, CON PLANOS CERRADOS.
<i>T<sub>Mbv-an III-b</sub></i>	1,200-1,400	-	ROCA INTEMPERIZADA, CONSISTENTE, FRACTURADA CON PLANOS ABIERTOS.
<i>T<sub>Mbv-an III-c</sub></i>	> 2500	20-100	ROCA SANA, MUY CONSISTENTE, FRACTURADA, CON PLANOS CERRADOS.
<i>T<sub>Mbv-an IV-b</sub></i>	1,200-1,400	-	ROCA INTEMPERIZADA, CONSISTENTE, FRACTURADA CON PLANOS ABIERTOS.
<i>T<sub>Mbv-an IV-c</sub></i>	> 2500	20-100	ROCA SANA, MUY CONSISTENTE, FRACTURADA, CON PLANOS CERRADOS.
<i>T<sub>Mpc</sub></i>	-	1-20	ROCAS SANAS, CONSISTENTES Y POSIBLEMENTE SATURADAS.

Figura 5.5.8 Unidades geotécnicas del Túnel II

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

SECCIÓN GEOTÉCNICA

Figura 5.5.9 Sección geotécnica Túnel II (ver plano 5.4)

ESTUDIO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DEL RAMAL CAMELINAS DEL LIBRAMIENTO SUR DE MORELIA

178

### b) *Análisis geotécnico del túnel*

El túnel excavado tendrá una longitud de 700 m comprendidos entre los km 3+495 y 4+195; el tramo inicial presenta techos de roca del entre 35 y 40 m, en la parte central de 80 a 120 m y hacia el tramo final varía entre 20 y 50 m

La mayor parte del túnel se ubicará en la unidad litológica TM bv-an, constituida por intercalaciones de derrames de andesita, brechas volcánicas y tobas arcillosas en proporción variable; una longitud pequeña del túnel atravesará probablemente la unidad litológica TM pc en la parte central, formada por tobas pumíticas arenosas; y finalmente, en el lado Morelia, se ubicará en los depósitos granulares empacados en suelos finos, que constituyen el deslizamiento Ocolusen II.

De acuerdo a la zonificación efectuada en este estudio, se presentan las siguientes condiciones geotécnicas:

- Del km 3+495 y 3+660 se presentará la subunidad geotécnica TM bv-an IVc, constituida principalmente por roca andesita sana, muy consistente y con fracturamiento cerrado.

Los tratamientos que muestra el proyecto ejecutivo en esta zona para las condiciones geotécnicas E al inicio,  $D^{(+)}$  y  $C^{(-)}$  a continuación, son adecuados y abarcan completamente la longitud del túnel bajo la condición geotécnica de esta subunidad.

- Del km 3+660 al 3+890 se tendrá la subunidad geotécnica TM bv-an IIIc, formada principalmente por brechas volcánicas sanas, muy consistentes y con fracturamiento cerrado.

El tratamiento indicado en el proyecto ejecutivo para la condición geotécnica  $C^{(+)}$  de este tramo se considera adecuado.

- Del km 3+890 al 3+970 se tendrá la subunidad geotécnica TM pc, formada por materiales piroclásticos arenosos, consistentes, con fracturamiento cerrado y posiblemente saturadas; se estima que la infiltración de agua hacia la excavación será pequeña.

El tratamiento indicado en el proyecto ejecutivo para la condición geotécnica  $C^{(+)}$  de este tramo se considera adecuado.

- Del km 3+970 al 4+120 se tendrá la subunidad geotécnica TM bv-an IIc, formada principalmente por andesitas con intercalación de brecha volcánica en condición sana, consistente, con fracturamiento cerrado.

El tratamiento indicado en el proyecto ejecutivo para las condiciones geotécnicas  $C^{(+)}$  y  $C^{(-)}$  de este tramo se considera adecuado.

- Del km 4+120 al 4+160 se tendrá la subunidad geotécnica TM bv-an Ib, constituida principalmente por brechas volcánicas amarillas con horizontes delgados de tobas arcillosas y derrames de andesita delgados, en condición intemperizada, consistente, con fracturamiento abierto.

El tratamiento indicado en el proyecto ejecutivo para las condiciones geotécnicas  $D^{(+)}$  y  $D^{(-)}$  de este tramo se considera adecuado.

- Entre el km 4+160 y 4+195 el túnel se ubica en la subunidad geotécnica  $Qd_b$ , dentro de los materiales producto del deslizamiento Ocolusen II, formados por bloques y fragmentos de roca sueltos a poco consolidados empacados en una matriz arcillo-arenosa.

El tratamiento indicado en el proyecto ejecutivo para la condición geotécnica **E** de este tramo se considera adecuado, posiblemente con pequeñas variaciones en la longitud de tratamiento realmente requerida.

El tratamiento del túnel en esta zona de la salida a Morelia, en particular en este tramo con condición geotécnica **E**, se considera adecuado para la estabilización del túnel tomando en cuenta únicamente el tipo de materiales que serán atravesados; sin embargo, como son materiales producto del deslizamiento Ocolusen II ( $Qd_b$ ) no se está considerando que en la actualidad estos depósitos presentan movimiento, ya sea de por creep o debido a su inestabilidad propia que se acelera o activa en los periodos de lluvia y ante actividad sísmica.

Específicamente para esta zona, la sección estructural de proyecto en el interior del túnel muestra un espesor de revestimiento de 0.35 m de concreto simple de  $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$ ; el tratamiento colocado durante la excavación y el revestimiento definitivo del túnel van a contribuir poco a la estabilización del deslizamiento, porque no fueron diseñados para este objetivo, por lo que es seguro que esta zona del túnel a mediano y largo plazo se verá afectada por los desplazamientos del terreno.

En el siguiente punto relacionado con el Portal Morelia, se vuelve a abordar este problema, que está asociado con la estabilidad general del terreno en esa zona.

En cuanto al diseño del túnel excavado, las variaciones observadas en la longitud de cada condición geotécnica son relativamente pequeñas y se consideran normales para este tipo de obras, sobre todo cuando la exploración realizada para elaborar el proyecto ejecutivo fue escasa por la falta de sondeos directos.

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de las condiciones geotécnicas del proyecto ejecutivo y la zonificación detallada elaborada en el presente estudio; sin embargo, las variaciones en el tratamiento requerido para la estabilidad del túnel son mínimas y en algunos casos son conservadoras.

PROYECTO EJECUTIVO			REVISIÓN
TRAMO km a km	CONDICIÓN GEOTÉCNICA	Longitud (m)	UNIDAD GEOTÉCNICA
3+495 a 3+516	E	21	TM bv-an IVc (km 3+495 a 3+660)
3+516 a 3+535	D <sup>(-)</sup>	19	
3+535 a 3+680	C <sup>(-)</sup>	145	
3+680 a 4+080	C <sup>(+)</sup>	400	TM bv-an IIIc (km 3+660 a 3+890) TM pc IIc (km 3+890 a 3+970) TMbv-an IIc (km 3+970 a 4+120)
4+080 a 4+120	C <sup>(-)</sup>	40	TM bv-an Ib (km 4+120 a 4+160)
4+120 a 4+141	D <sup>(+)</sup>	21	
4+141 a 4+165	D <sup>(-)</sup>	24	
4+165 a 4+195	E	30	Qd <sub>b</sub> (km 4+160 a 4+195)

## 5.6 ZONA DEL PORTAL DE SALIDA DEL TUNEL II Y DESLIZAMIENTO OCOLUSEN

Como parte fundamental de este trabajo se realizó un mayor detalle geológico y geotécnico en la zona del portal de salida del túnel II, el cual se encuentra dentro del denominado Deslizamiento Ocolusen II.

Es evidente, al observar las fotografías aéreas y de satélite, que a lo largo del escarpe "La Paloma" se han desarrollado condiciones geotécnicas desfavorables que han propiciado el desarrollo de una serie de deslizamientos, que inclusive se extienden más allá de la zona de Ocolusen.

El enfoque dado a las exploraciones geológicas y geofísicas realizadas en este trabajo, además de la definición litológica y estructural del cantil "La Paloma" en la zona del deslizamiento Ocolusen II, fue el de investigar y tratar de definir cuál es o son esas condiciones geotécnicas, para esto se decidió extender las investigaciones a ambos lados del eje del túnel II.

Del lado derecho del eje del túnel se extiende la mayor parte de los deslizamientos Ocolusen II y III, mientras que del lado izquierdo se encuentra muy cerca del límite lateral del deslizamiento II, donde aparece un afloramiento "in situ" del macizo rocoso de unos 100 m de ancho, que aparentemente funciona como troquel natural de la ladera, ya que después de éste se localiza nuevamente el deslizamiento Ocolusen I. La zona estudiada comprende aproximadamente una longitud de 300 m paralelos al cantil.

En este estudio no se contó con información proveniente de sondeos, con excepción del SM-8 realizado por (LACM, 2009), por lo que las condiciones geotécnicas del terreno se han derivado principalmente de la exploración geofísica de tipo sísmica y eléctrica, del retroanálisis de estabilidad varias secciones del cantil y de los detalles del terreno observados durante los levantamientos geológicos de campo.

### 5.6.1 Características geotécnicas de las rocas andesíticas (Tmbv-an) en el escarpe y de los materiales del deslizamiento Ocolusen (Qd)

Como se describió en el inciso de *Condiciones Geológicas*, los estudios realizados en esta etapa determinaron que el macizo rocoso del escarpe presenta una cubierta de 30 a 40 m de roca de calidad muy pobre a pobre, que representa una zona de riesgo por deslizamiento, además del depósito de propio deslizamiento Ocolusen II que lo cubre en la parte baja de la ladera.

A continuación se presentan los trabajos realizados para determinar de forma aproximada las características geotécnicas de estas unidades litológicas.



**5.5.1.1 De la exploración geológica**

En el plano 5.5 se presenta un mapa geológico de la zona del portal de salida del túnel 2 que muestra la distribución de las unidades litológicas, los límites de los diversos deslizamientos y las fracturas y escarpes observados en los levantamientos de campo; incluye también la ubicación de las diversas exploraciones geofísicas realizadas para detallar las condiciones del subsuelo en esa zona. En la figura 5.6.1 se presenta este mapa geológico.

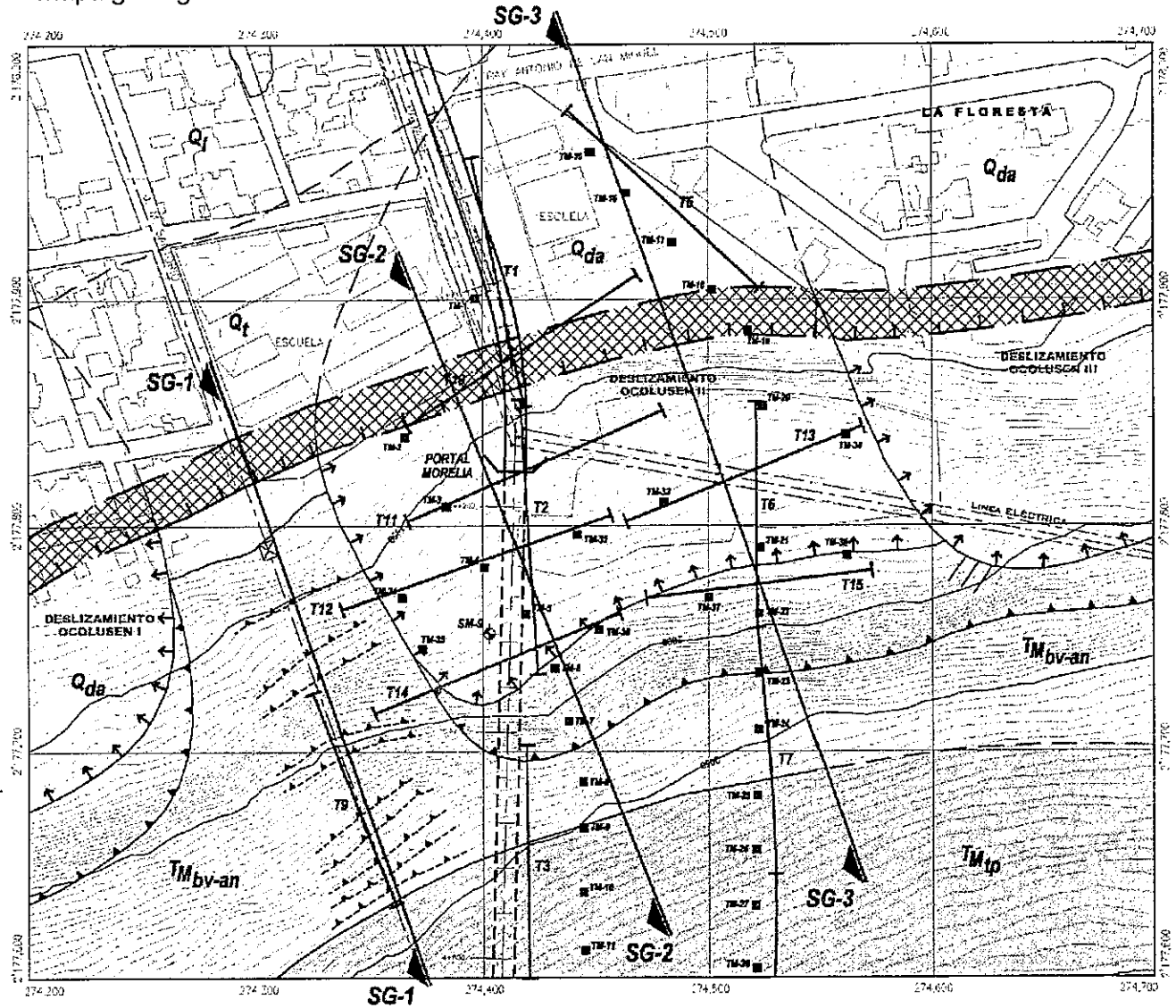


Figura 5.6.1 Mapa geológico de la zona del portal de salida del Túnel II

El plano 5.5 también incluye tres secciones geotécnicas, que integran la información geológica y geofísica realizada en esta zona, las cuales atraviesan en sentido longitudinal las zonas de mayor interés para analizar la estabilidad de la zona:

- La Sección Geotécnica 1 se ubica en el centro del Deslizamiento Ocolusen II (Figura 5.6.2).
- La Sección Geotécnica 2 se localiza cerca del borde poniente del Deslizamiento Ocolusen II y va por el eje del túnel II (Figura 5.6.3).
- La Sección Geotécnica 3 se ubica sobre el “troquel natural” de roca in situ o que no ha sufrido desplazamiento, localizada entre los deslizamientos Ocolusen I y II (Figura 5.6.3).

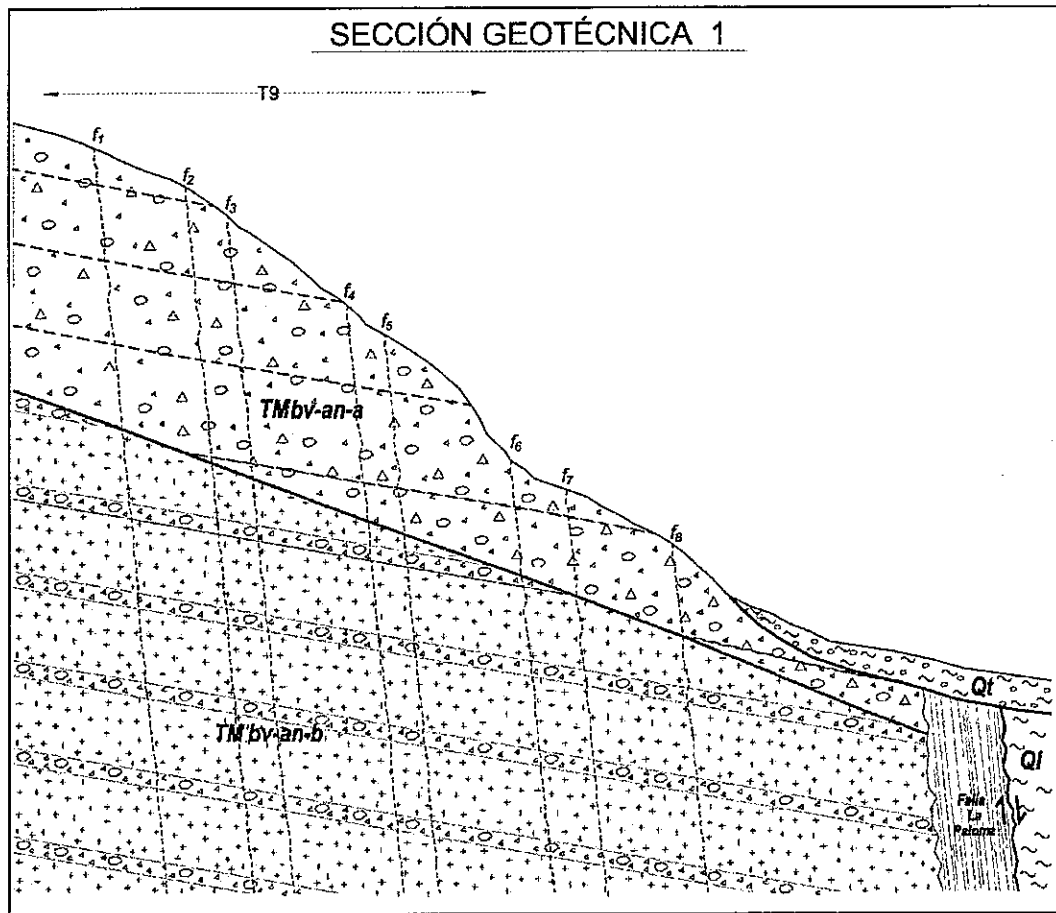


Figura 5.6.2 Sección geotécnica 1

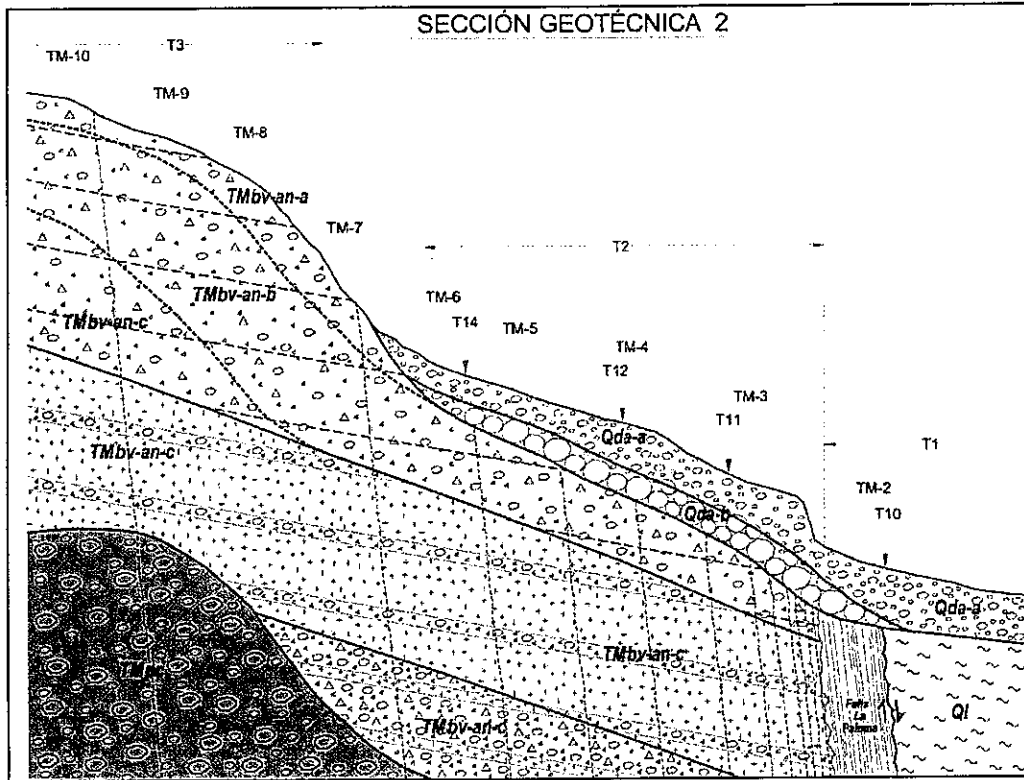


Figura 5.6.3 Sección geotécnica 2

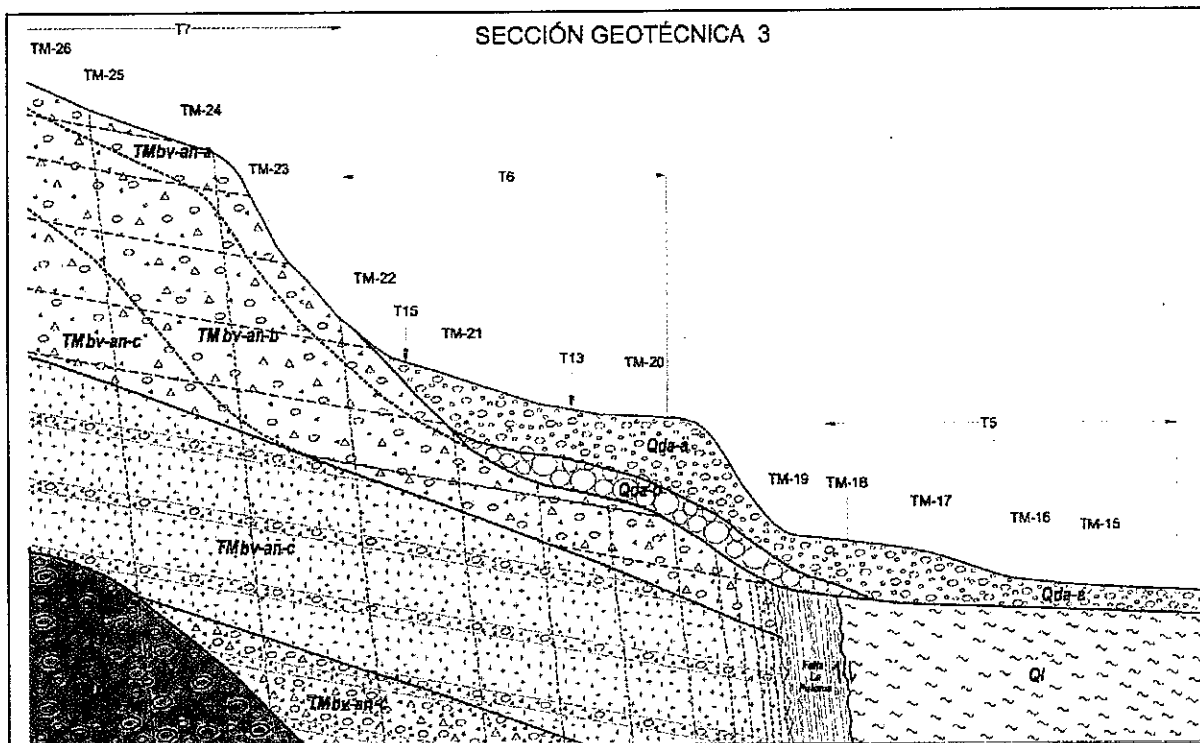


Figura 5.6.4 Sección geotécnica 3

### Índice de relajación y alteración en la unidad TM bv-an

Las velocidades sísmicas determinadas en tendidos geosísmicos permitieron determinar la existencia de una franja paralela a la superficie del cantil (subunidad TMbv-an Ia), donde las velocidades son del orden de 750 a 1,200 m/s, que indican características de roca muy relajada, alterada y fracturada, con espesor de 10 a 12 m.

Bajo esta franja, se presenta una segunda zona, con velocidad sísmica entre 1,350 y 2,200 m/s (subunidad TMbv-an Ib), que corresponde a una roca alterada pero relativamente menos relajada, fracturada y con planos abiertos, con un espesor de 20 a 30 m.

Ambas franjas de roca de pobre calidad corren de forma paralela a la superficie del cantil con 30 a 40 m de espesor total.

El índice de relajación  $I_{rej}$  determinado en las tres secciones sísmicas estudiadas en el cantil, muestran que la primera franja tiene un porcentaje de relajación entre 52 y 70%, mientras que la segunda franja entre 12 y 46%. Los índices mayores que 50% son considerados muy elevados y representan un macizo rocoso propicio para su inestabilidad.

$$* \text{Índice de relajación: } I_{rej} = (V_{p(m\acute{a}x.)} - V_p) / V_{p(m\acute{a}x.)} \times 100$$

De acuerdo con el análisis de la información adquirida en este estudio, la relajación de la roca andesítica TM bv-an en el cantil, se puede atribuir a tres aspectos principales:

- *Afectación del terreno por su cercanía a la falla regional "La Paloma"*

Durante la ocurrencia de los desplazamientos de la falla La Paloma, un espesor del macizo rocoso ubicado cerca del plano principal fue afectado por fracturamiento inducido, generando un sistema de fracturamiento subparalelo a dicho plano, conforme el macizo se encuentra más retirado de la falla regional, el fracturamiento inducido se reduce o desaparece (Foto 5.6.1).

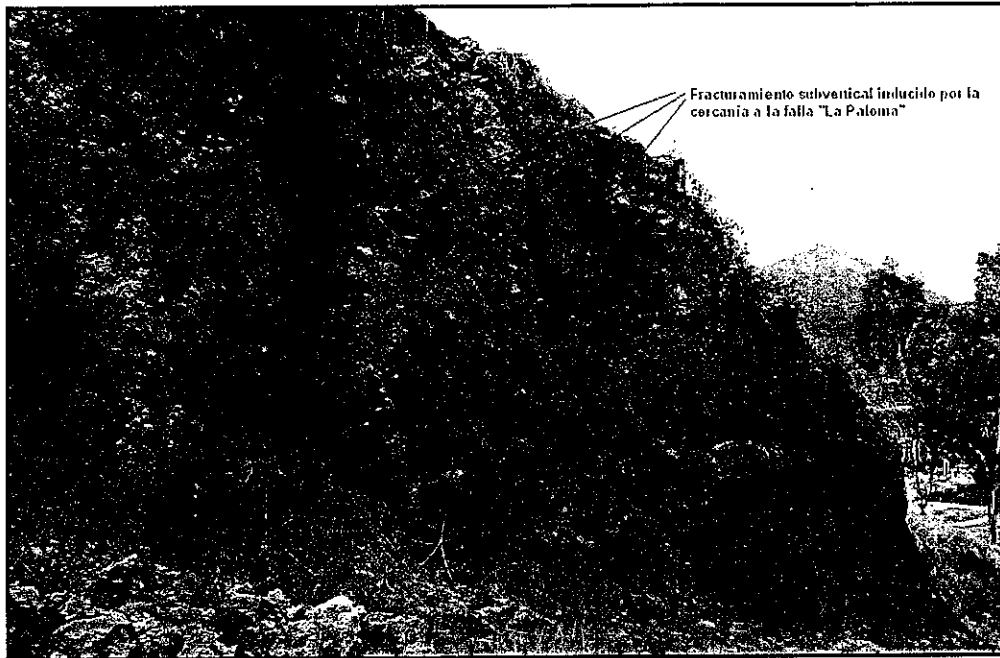


Foto 5.6.1 Fracturamiento inducido por la falla La Paloma

- *Heterogeneidad del macizo rocoso volcánico, TM bv-an*

Específicamente se refiere a la alternancia de brechas volcánicas, derrames de lava andesítica y tobas arcillosas, dispuestas estructuralmente en capas subhorizontales. En campo se observaron estas capas horizontales y con buzamiento ligero ( $5^\circ$  a  $10^\circ$ ) hacia el exterior de la ladera (Foto 5.6.2).

Es frecuente observar las capas de brecha volcánica alteradas, posiblemente por el flujo de agua a través de ellas, al grado de quedar transformadas a arcilla de tipo montmorillonita. Aunque en este estudio no se realizaron determinaciones de tipo de arcilla, por regla general este es el tipo de arcilla que se deriva de la alteración de rocas volcánicas básicas; por otra parte, en la información recopilada se reporta el caso de arcillas expansivas en los materiales del deslizamiento contiguo (zona del deslizamiento del camino a la Cumbre, por lo que en cierta forma se comprueba lo antes mencionado.



Foto 5.6.2 *Inclinación de la unidad TM bv-an y presencia de tobas arcillosas alteradas*

Estas capas débiles de baja a muy baja resistencia al esfuerzo cortante se observan con más frecuencia cerca de la superficie debido al intemperismo, aspecto que contribuye a la relajación del macizo por del desplazamiento del terreno, sobre todo en zonas con pendiente topográfica fuerte.

- *Acción sísmica y presión hidrostática*

La ciudad de Morelia se ubica en los límites de de las zonas sísmicas B y C de acuerdo con la carta de Zonificación Sísmica de la República Mexicana (Figura 5.6.5); además de que la falla regional "La Paloma" se ha considerado como una estructura geológica potencialmente activa. Las fuerzas causadas por los sismos inducen y contribuyen también a la relajación del macizo rocoso.

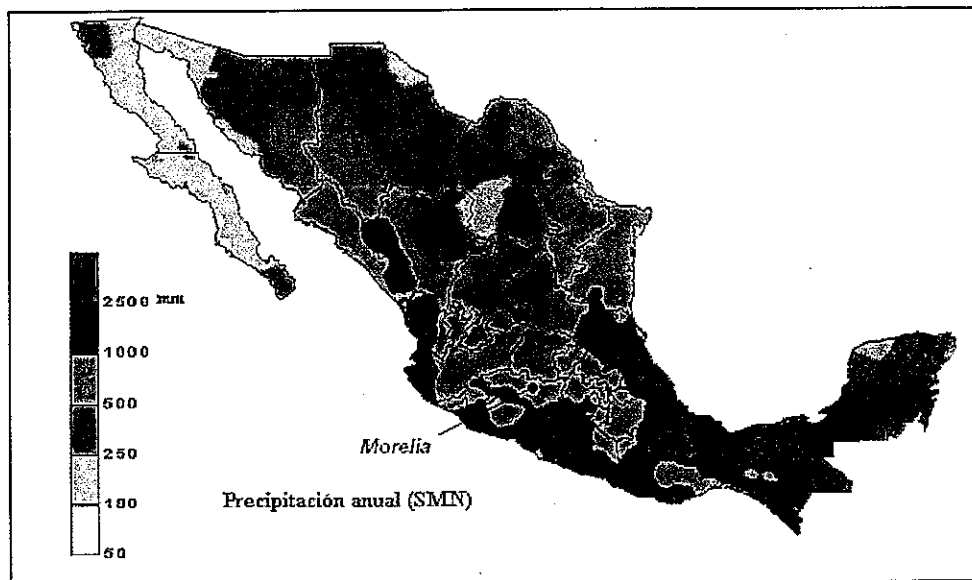
El coeficiente sísmico asignado para esta región es de  $C_s = 0.36$ , sin embargo, la aceleración del terreno puede amplificarse en la parte superior del cantil por la forma topográfica del sitio.



Figura 5.6.5 Carta sísmica de la República Mexicana

Adicionalmente, la infiltración de agua de lluvia en las discontinuidades sub verticales que presenta la unidad TM bv-an cerca del cantil, contribuye a la alteración de la roca y principalmente ejerce presión hidrostática que abre gradualmente las fracturas y provoca pequeños desplazamientos que relajan el terreno, en el caso extremo hasta producir la falla del mismo.

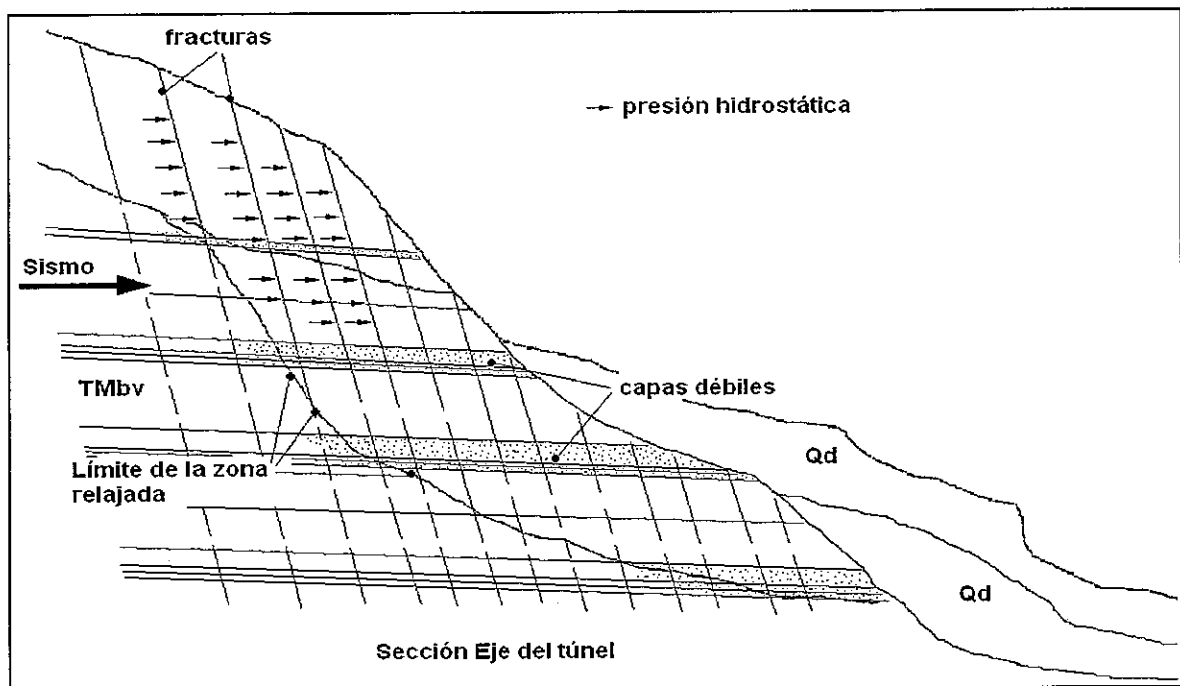
La ciudad de Morelia se ubica en una zona cuya precipitación media anual oscila entre los 500 y 1000 mm, tal como se ilustra en la figura 5.6.6.



5.6.6 Mapa de precipitación media anual de la Rep. Mexicana

Como resumen se puede decir que los dos primeros aspectos mencionados son características inherentes al terreno, mientras que el tercero corresponde a fuerzas externas que actúan de forma intermitente, las cuales se les considera agentes disparadores de deslizamientos.

Se considera que el desarrollo y la combinación de los tres factores descritos arriba, han propiciado la relajación y alteración de la ladera y provocado los deslizamientos del escarpe "La Paloma", al menos en la zona de Ocolusen; tal como se representa en la figura 5.6.7.



5.6.7 Factores que han intervenido en la relajación y deslizamiento del escarpe

### 5.6.1.2 Del retroanálisis de estabilidad

El objetivo del retroanálisis de estabilidad fue el tratar de establecer, de forma aproximada, los parámetros de resistencia de las unidades litológicas presentes en la zona del portal de salida.

Posteriormente estos parámetros fueron utilizados para realizar el análisis de estabilidad en dos zonas: en cantil o troquel natural donde la roca está "in situ" y en la zona del Deslizamiento Ocolusen II.



- *Retroanálisis en el cantil o troquel natural*

Utilizando la Sección Geotécnica 3, representativa de la zona del "troquel natural", se realizó el retroanálisis para establecer las propiedades de resistencia de la unidad litológica Tmbv-an 1a (Figura 5.6.8).

Esta sección se localiza del lado izquierdo del eje del túnel, en la zona donde la roca andesítica se encuentra in situ, pero el macizo rocoso está muy relajado, de acuerdo con las velocidades sísmicas registradas.

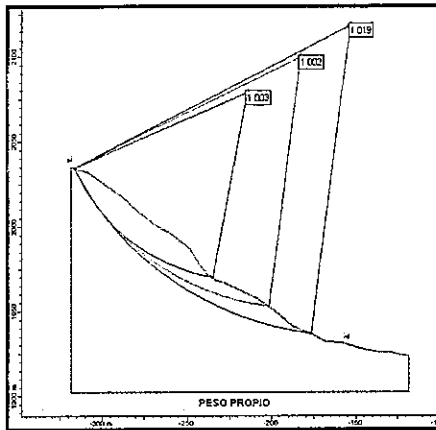
En el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos del retroanálisis. En color rojo se resaltan los valores que se consideran más representativos de esta unidad.

### SECCIÓN GEOTECNICA 3 - "TROQUEL NATURAL"

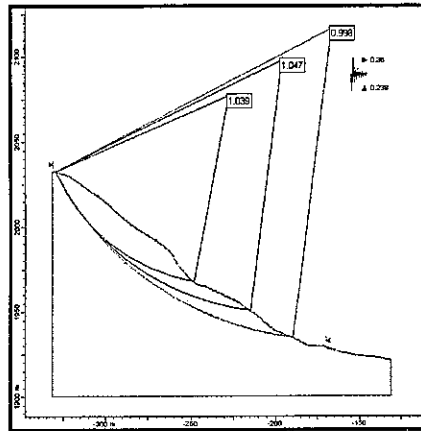
*Retroanálisis para estimación de propiedades del troquel potencialmente inestable*

SECCIÓN	CONDICIÓN	Rango de propiedades estimadas para un F.S. = 1		NOTAS
		Ángulo de fricción	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	
3	Peso propio	34°	0	
	Sismo	34° 56°	1.25 0	
	Presión hidrostática máxima	34° 53°	0.85 0	

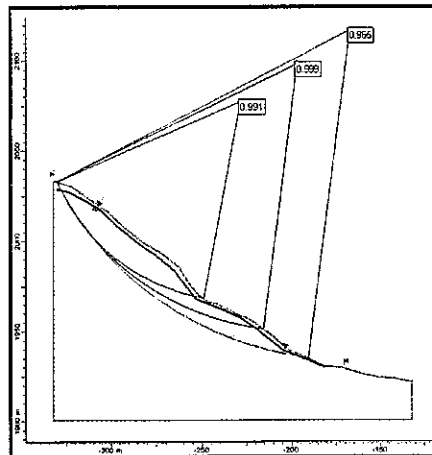
\* Valores en color rojo: seleccionados como representativos de la roca Bv-An alterada



Peso Propio



Sismo



Presión hidráulica máxima

Figura 5.6.8 Retroanálisis de la Sección 1, "Troquel de roca"

• *Retroanálisis en el deslizamiento Ocolusen II*

Utilizando la Sección Geotécnica 1, representativa de la zona central del "deslizamiento Ocolusen II" y donde se presenta el mayor espesor de materiales deslizados, se realizó el retroanálisis de estabilidad para determinar las propiedades de resistencia de los materiales que lo constituyen (Figura 5.6.9).

En el siguiente cuadro se presentan los resultados obtenidos. En color rojo se resaltan los valores que se consideran más representativos de esta unidad.

**SECCIÓN 1 - "DESLIZAMIENTO OCOLUSEN"**

*Retroanálisis para estimación de propiedades del deslizamiento*

SECCIÓN	CONDICIÓN	Rango de propiedades estimadas Para un F.S. = 1		NOTAS
		Ángulo de fricción	Cohesión (kg/cm <sup>2</sup> )	
1	Peso propio	10°	0.55	
		15°	0.32	
		20°	0	
	Sismo	10°	1.50	
		15°	1.30	
		20°	1.15	
	Presión hidrostática máxima	10°	0.61	
		15°	0.45	
		20°	0.28	

\* Valores en color rojo: seleccionados como representativos de los materiales del deslizamiento (Qd)

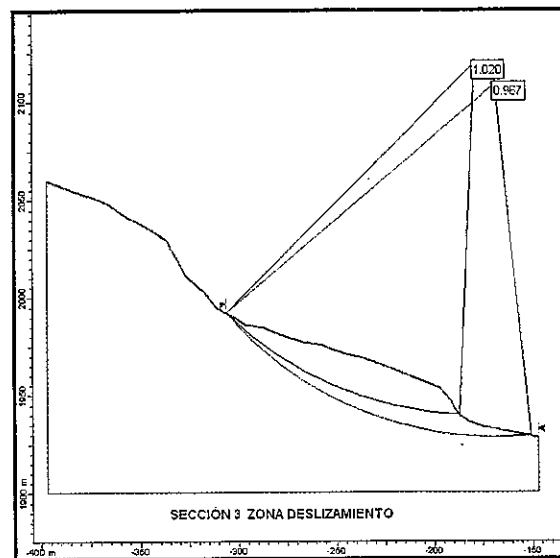


Figura 5.6.9 Retroanálisis de la Sección 3, "Deslizamiento Ocolusen"

### 5.6.1.3 De las observaciones de campo

La línea eléctrica que cruza la parte central del deslizamiento Ocolusen II muestra, en dos zonas, que los tres postes de energía están deformados verticalmente (fotos 5.6.3 y 5.5.4); esta deformación es debida a la tensión de los cables en la parte superior y el desplazamiento del terreno de cimentación en la inferior.

El desplazamiento de los postes permite establecer que en la actualidad el material del depósito del deslizamiento Ocolusen está activo, con un factor de seguridad muy cercano a la unidad; aunque se desconocen parámetros importantes como son la profundidad del plano de deslizamiento y su velocidad de desplazamiento. El movimiento del terreno podría ser solo superficial, de unos pocos metros de espesor o bien podría involucrar todo el espesor del depósito.



Foto 5.6.3 Vista de la deformación de los postes de la línea eléctrica

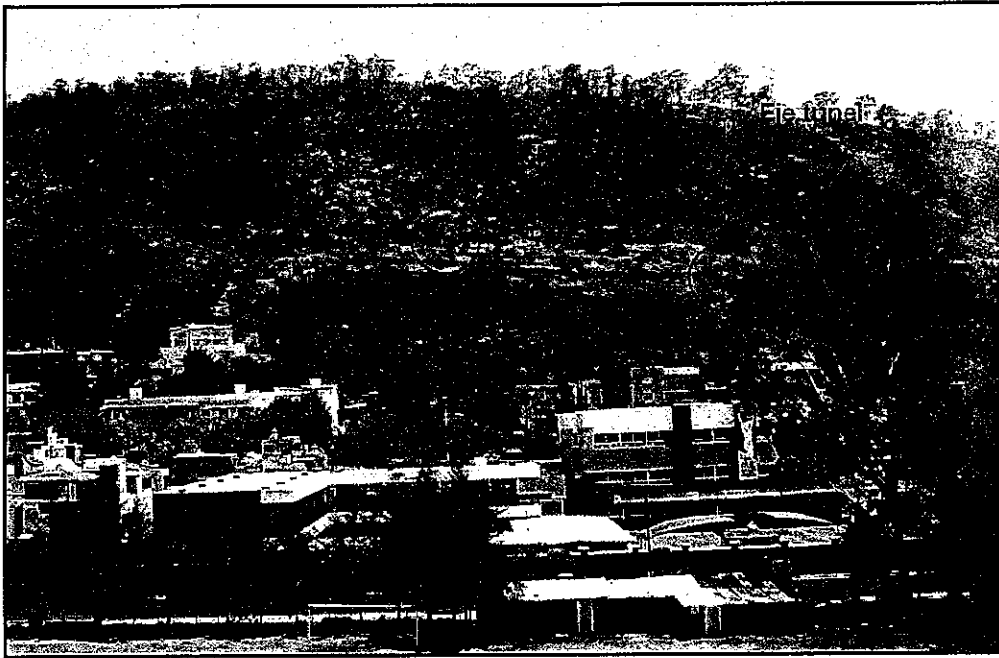


Foto 5.6.4 Línea eléctrica con postes deformados en la zona del deslizamiento Ocolusen

Por otra parte, algunas de las viviendas que se localizan al pie del escarpe presentan agrietamientos y/o deformación perceptible a simple vista, que sugieren que la masa involucrada en el movimiento es importante (foto 5.6.5).



Foto 5.6.5 Construcciones en la parte baja del deslizamiento que muestran las paredes y escalones deformados

Otro aspecto morfológico importante que se observa en la zona del troquel de roca (Sección Geotécnica 1), son una serie de escalones en la parte superficial del terreno que indican desplazamientos superficiales del macizo rocoso TM bv-an.

La excavación del túnel II a través del deslizamiento Ocolusen II, así como las excavaciones exteriores incluidas en el proyecto y las que se requerirán en la construcción, van a inducir un cierto grado adicional de inestabilidad al deslizamiento ya existente. Los tratamientos actualmente proyectados para la estabilidad de las obras a la salida del túnel y del propio portal, no consideran este problema.

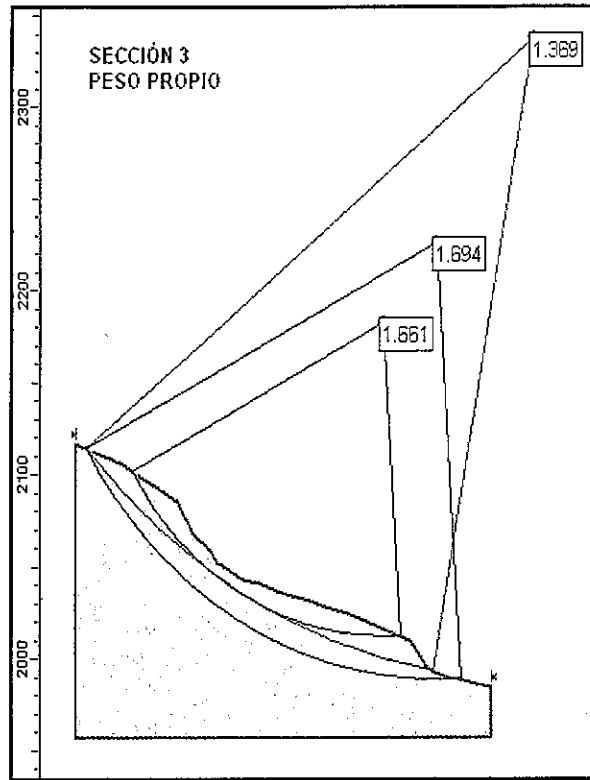
### 5.5.2 Análisis de sensibilidad del cantil "La Paloma", zona Ocolusen

Utilizando la Sección Geotécnica 3 y los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante determinados de los retroanálisis, se realizó el análisis de sensibilidad de la ladera actual que constituye el escarpe "La Paloma", involucrando tanto a la franja de roca relajada como al mismo depósito del deslizamiento.

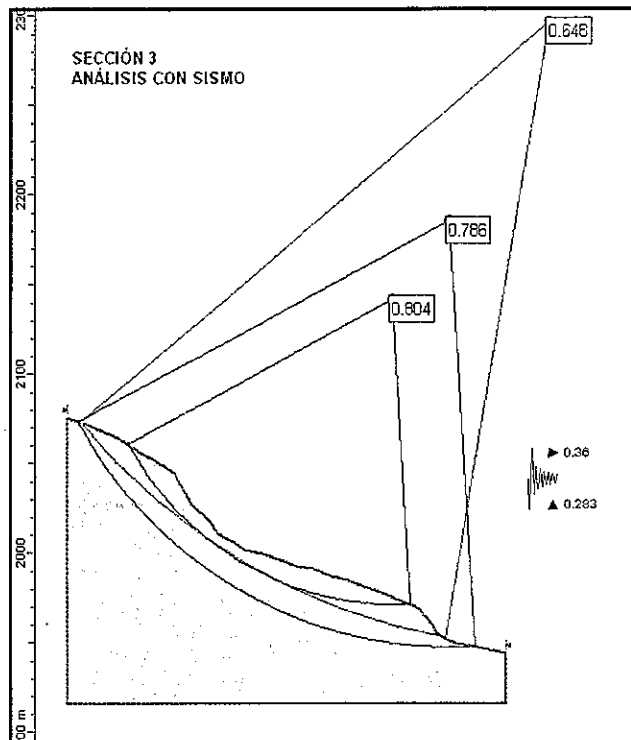
El mecanismo de falla seleccionado es de tipo circular, porque es el mismo mecanismo que ha actuado en los deslizamientos del escarpe; el grado de relajación, fracturamiento y alteración de la brecha volcánica permite que se desarrolle este mecanismo.

El análisis de estabilidad se realizó tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

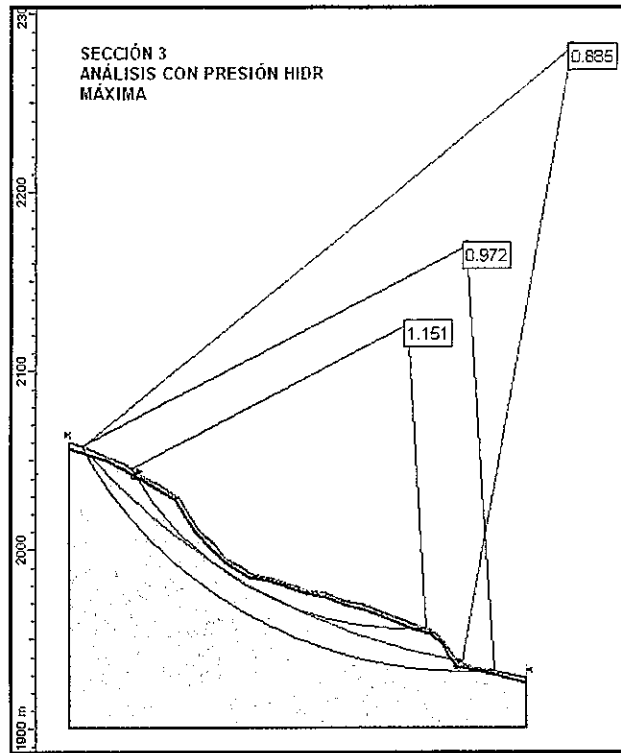
- Peso volumétrico de la roca andesítica TMbv-an:  $2.5 \text{ t/m}^3$
- Peso volumétrico del material del deslizamiento:  $2.2 \text{ t/m}^3$
- Método de análisis: Bishop simplificado
- Coeficiente sísmico:  $C_s=0.36$ , aplicado horizontalmente en la dirección más desfavorable, con una componente vertical ascendente equivalente a  $0.65$  del  $C_s$ .
- Presión hidrostática máxima, equivalente a saturación completa del terreno debido a una condición de tormenta intensa y prolongada.
- Los parámetros de resistencia empleados en cada unidad litológica son los indicados en los cuadros anteriores.
- Las fronteras de distintos materiales fueron tomadas de la sección geotécnica 1.
- Se realizó un número importante de análisis de estabilidad, sin embargo para fines de este informe se presentan los resultados más importantes determinados en tres círculos de falla que se seleccionaron como los más representativos de la ladera y que involucran a las unidades litológicas de roca andesítica TMbv-an más relajada y alterada, y al depósito de deslizamiento Qd (Figura 5.6.11).



Peso propio



Sismo



Presión hidráulica máxima

Figura 5.6.11 Análisis de estabilidad del escarpe La Paloma

Los resultados de los análisis de estabilidad del escarpe “La Paloma” empleando los rangos de valores de resistencia indicados en los cuadros anteriores se muestran en la siguiente tabla:

SECCIÓN GEOTÉCNICA 3 - ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Estimación del Factor de Seguridad de la ladera actual

SECCIÓN GEOTÉCNICA	CONDICIÓN	FACTOR DE SEGURIDAD
3	Peso propio	1.24 a 1.47
	Sismo	0.64 a 0.74
	Presión hidráulica máxima	0.96 a 1.0



### *Resumen del análisis de estabilidad*

Peso propio: en esta condición los factores de seguridad determinados muestran que la estabilidad del conjunto escarpe - deslizamiento es ligeramente adecuada. Para taludes, en este caso cercanos a zonas urbanas donde existe riesgo de daños, se recomienda un factor de seguridad mínimo de 1.5 y más adecuado de 2.0.

Análisis con sismo: los factores de seguridad obtenidos bajo esta condición se reducen de manera importante por debajo del límite de equilibrio entre un 26 y 36%; en caso de falla del terreno no significa forzosamente que se pueda llegar a producir un desplazamiento de masa similar a los antiguos deslizamientos ocurridos en Ocolusen y que inclusive llegarían a afectar a la zona urbana, sin embargo si es seguro que afectaría de forma importante el Túnel II y la zona del portal de salida.

Por otra parte, como se anotó antes, el coeficiente sísmico en esta zona podría ser mayor que el empleado en los análisis, por la presencia de la falla regional y por el efecto de amplificación por la topografía del terreno, razones por lo que se considera que el análisis realizado es poco conservador y los factores de seguridad podrían ser menores que los mostrados en el cuadro anterior.

Análisis con presión hidrostática: los factores de seguridad igualmente se reducen bajo la acción de esta condición, en el caso más desfavorable hasta un 8% bajo el límite. Puede decirse ante lluvias intensas y prolongadas la estabilidad de la ladera se encuentra en el límite. Cada año durante la temporada de lluvias actúa la presión hidrostática en la ladera, su intensidad depende de la intensidad y duración de la precipitación, este fenómeno es cíclico o recurrente y produce seguramente los movimientos que se observan en el depósito de deslizamiento, los escalonamientos y fracturas abiertas que se observan en varios puntos del escarpe.

Como complemento del análisis de sensibilidad se determinaron los parámetros de resistencia mínimos requeridos en para las tres condiciones analizadas con el objeto de conocer la variación de éstos. Los resultados muestran que estas variaciones son pequeñas, por ejemplo para el caso más significativo del análisis con sismo, la cohesión requerida es del orden de 2.4 kg/cm<sup>2</sup> en la roca TM bv-an, comparado con el rango de valores empleados de 0.85 a 1.25 Kg/cm<sup>2</sup>.

Esto indica que pequeñas variaciones en la cohesión del terreno produce cambios importantes en el factor de seguridad de la ladera. Los cambios en el ángulo de fricción del terreno influyen poco en el cambio del factor de seguridad, por lo que se verifica que la alteración del macizo rocoso, que reduce su cohesión, juega un papel más importante en la estabilidad de la ladera.

Con base en estos resultados se puede concluir que el escarpe "La Paloma" en la zona Ocolusen presenta condiciones potenciales de inestabilidad natural que podrían ser aceleradas por las obras del túnel y las excavaciones a cielo abierto proyectadas. Estas condiciones potenciales de inestabilidad no fueron consideradas para el diseño del portal de salida del Túnel II.

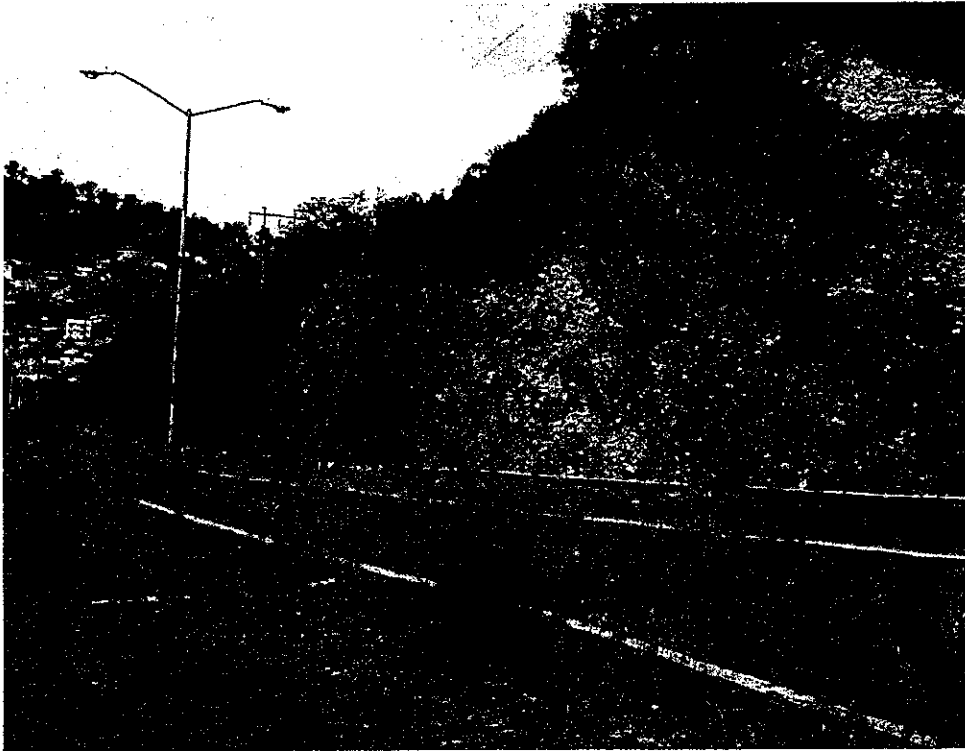
### **5.5.3 Condiciones de estabilidad de la zona del "troquel de roca"**

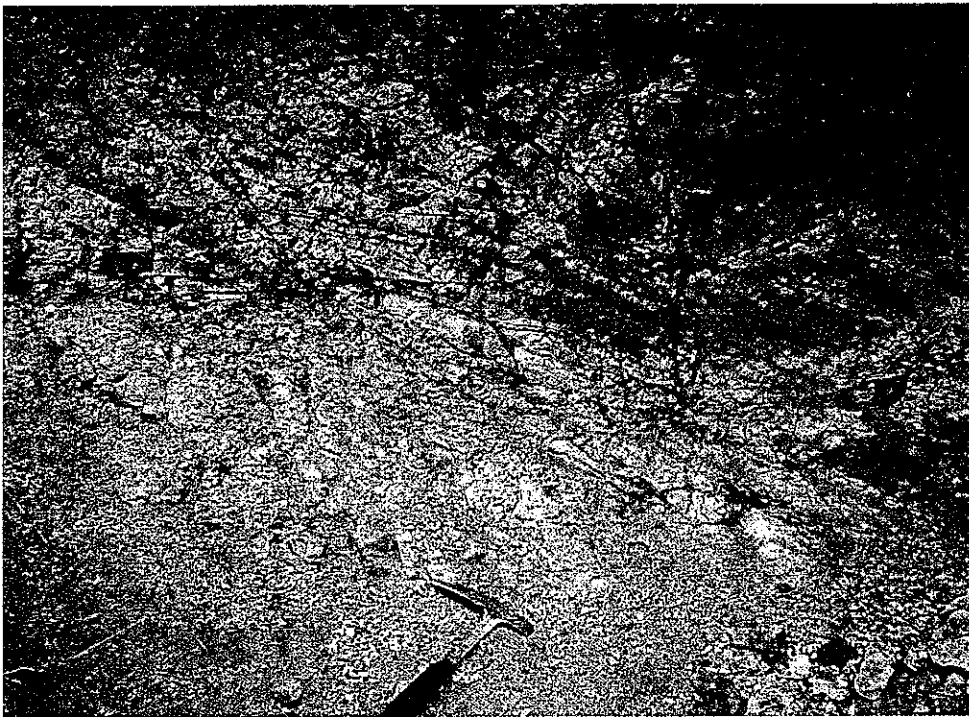
El "troquel" de roca ubicado a la izquierda del eje del túnel es una zona que por alguna razón geológica-geotécnica no falló cuando se presentaron los deslizamientos Ocolusen I y II, permaneciendo "in situ" actualmente y como un límite entre ellos; sin embargo, se considera que el riesgo de deslizamiento de esta zona es alto y que el término de "troquel" es bastante relativo en la actualidad, ya que muestra un grado de relajación muy acentuado.

Para tratar de establecer la importancia que tiene este detalle geológico, se presenta la siguiente hipótesis:

En caso de que se deslizará la zona del "troquel", dada la mala calidad de la roca en la franja superficial de 30 a 40 m de espesor que actualmente presenta, la falla involucraría la parte baja del deslizamiento Ocolusen II, en donde la roca de la unidad TMBv-an Ib presenta también calidad pobre; ésta zona es precisamente la que va a atravesar el Túnel II.

Por esta razón, los tratamientos y el revestimiento del túnel II entre los km 4+120 y 4+160 deberían ser diseñados de tal forma que tomen en cuenta este riesgo y no solo eso, sino que sirvan para reforzar la base del escarpe al menos en esta zona. En caso de no realizar dichos tratamientos, la excavación del túnel debilitará más el terreno de esta unidad litológica.



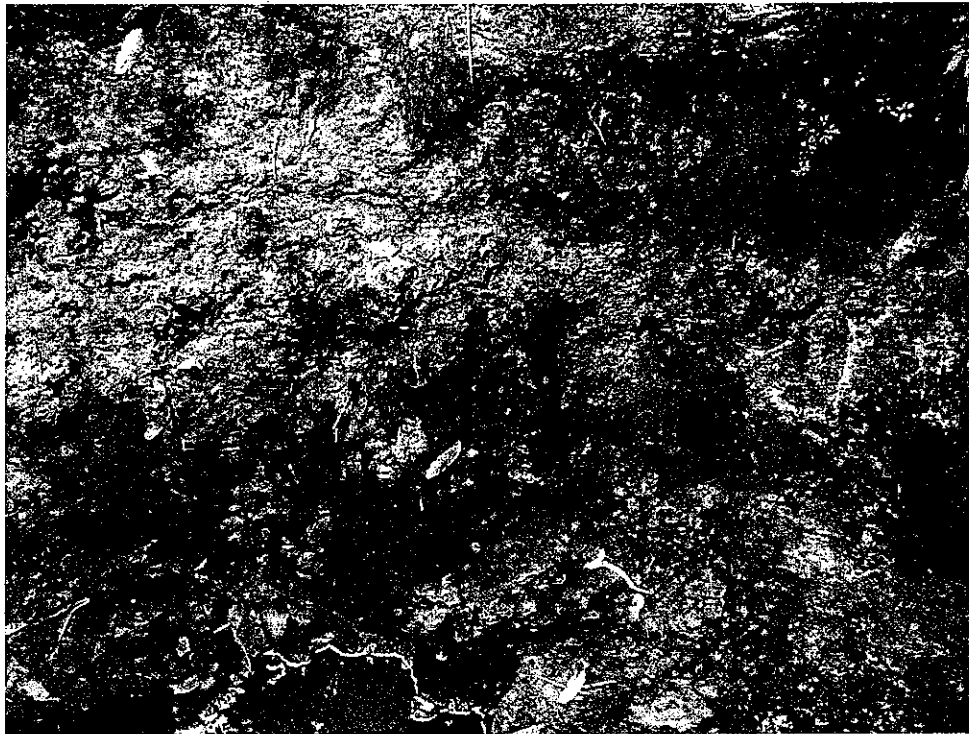


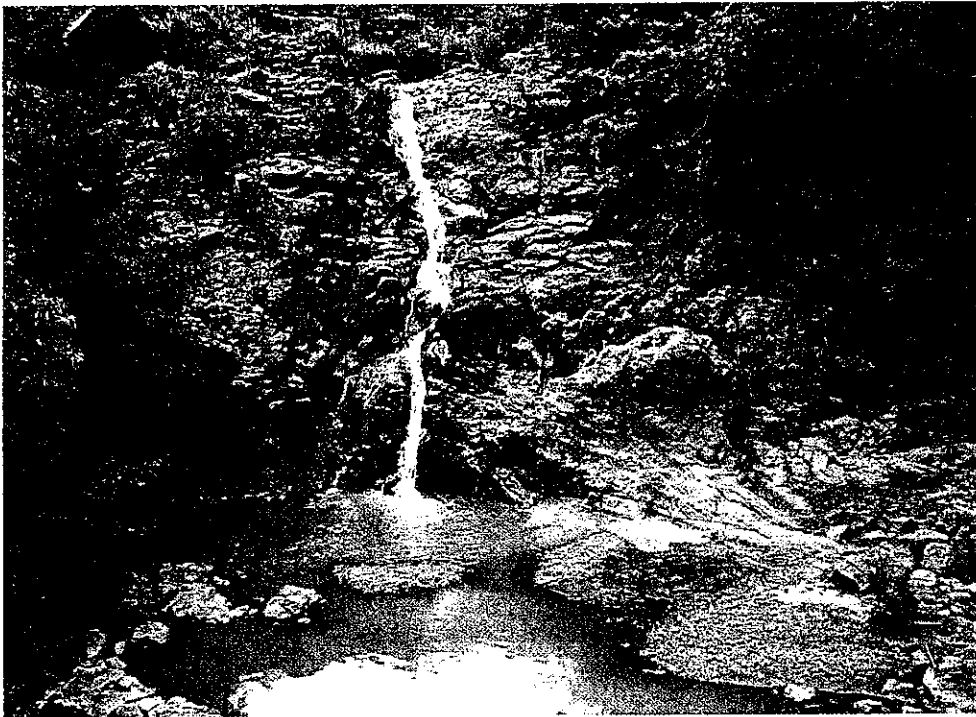


Brechas volcánicas, tobas y derrames andesíticos  
(TM bv-an)

Secuencia Superior













Toba Pumítica (TM tp)

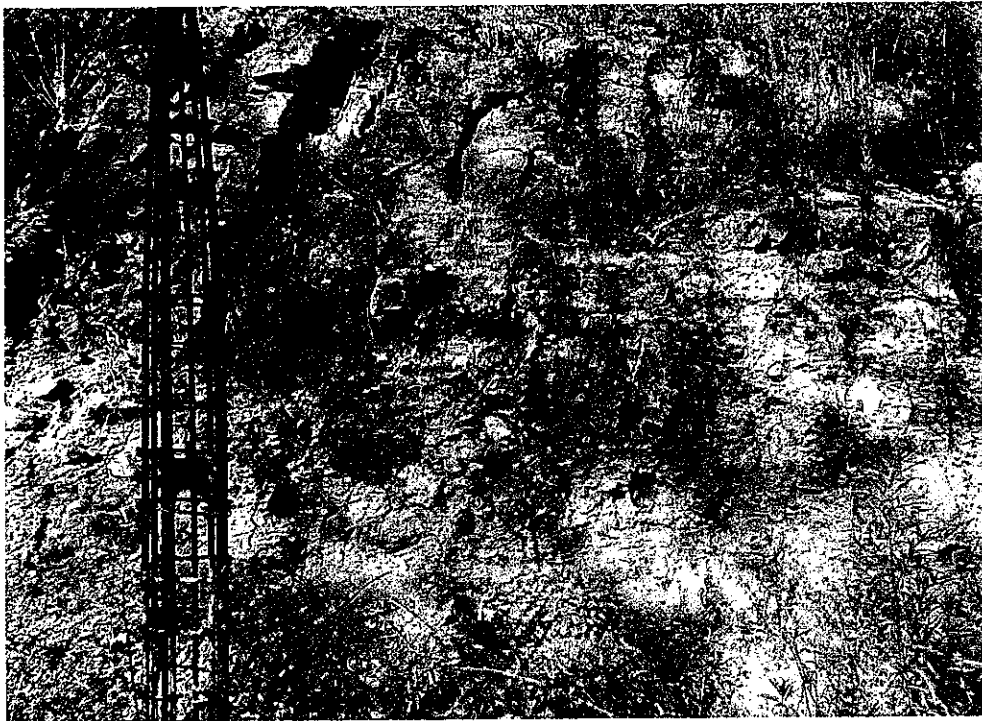




Conglomerados (TM cg)









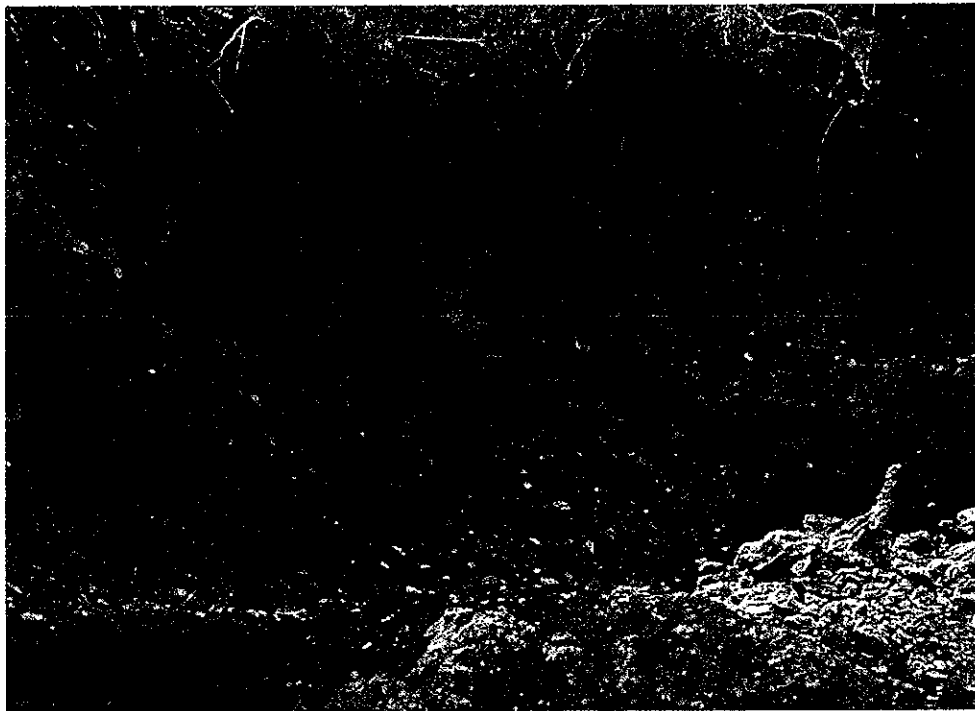
Ignimbrita (TM ig)







Material de deslizamiento (Qd)







**ANEXO 3.1**  
**FOTOGRAFICO**



2020

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

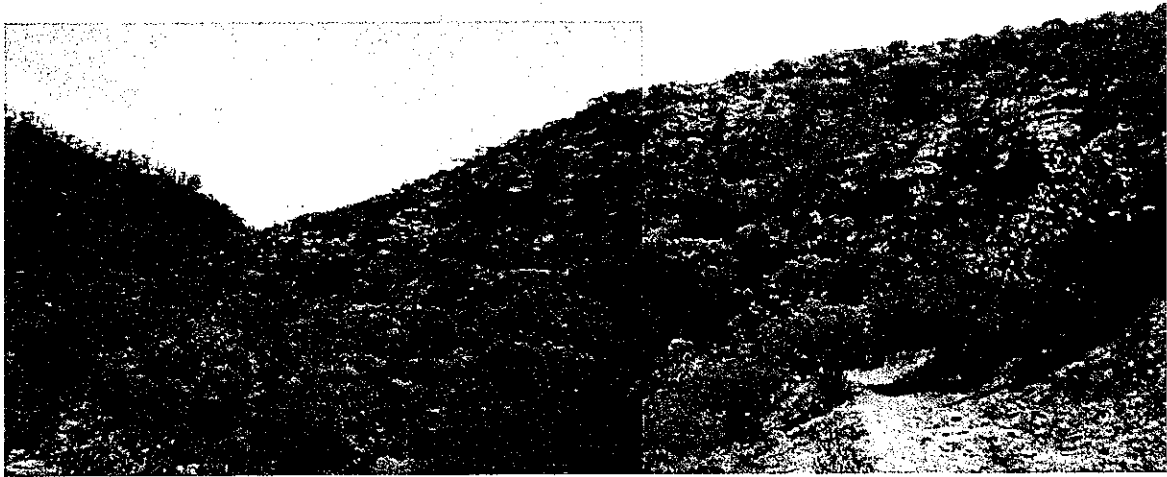
---

## **Geomorfología y Distribución Litológica**













## Zona de Corte 1





## Zona de Corte 2





**Zona de Portal de Entrada**  
**Túnel I**







Deslizamiento  
Ocolusen II

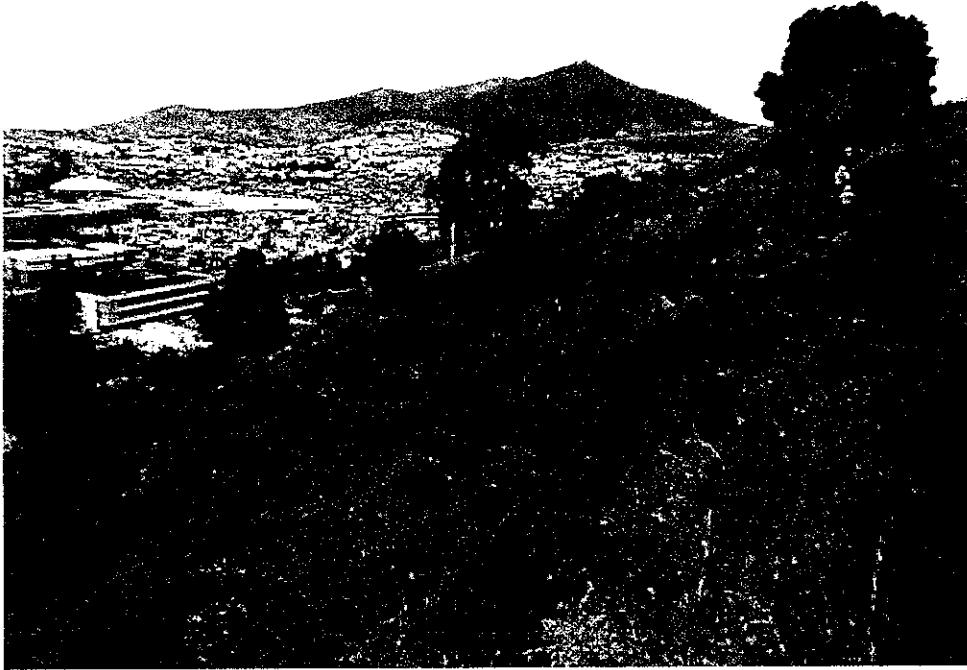


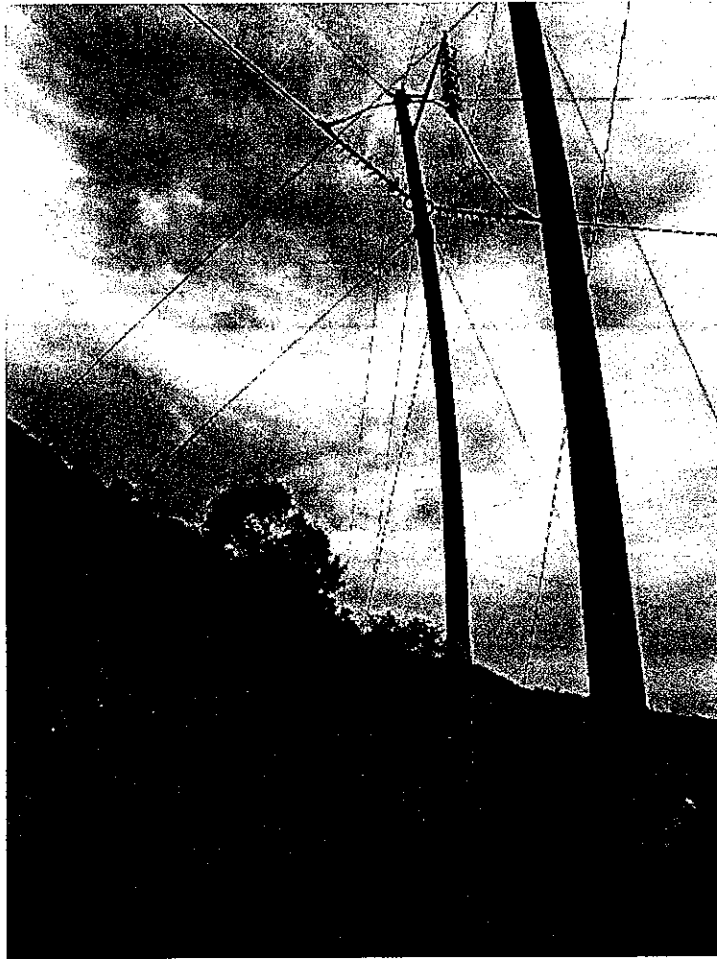






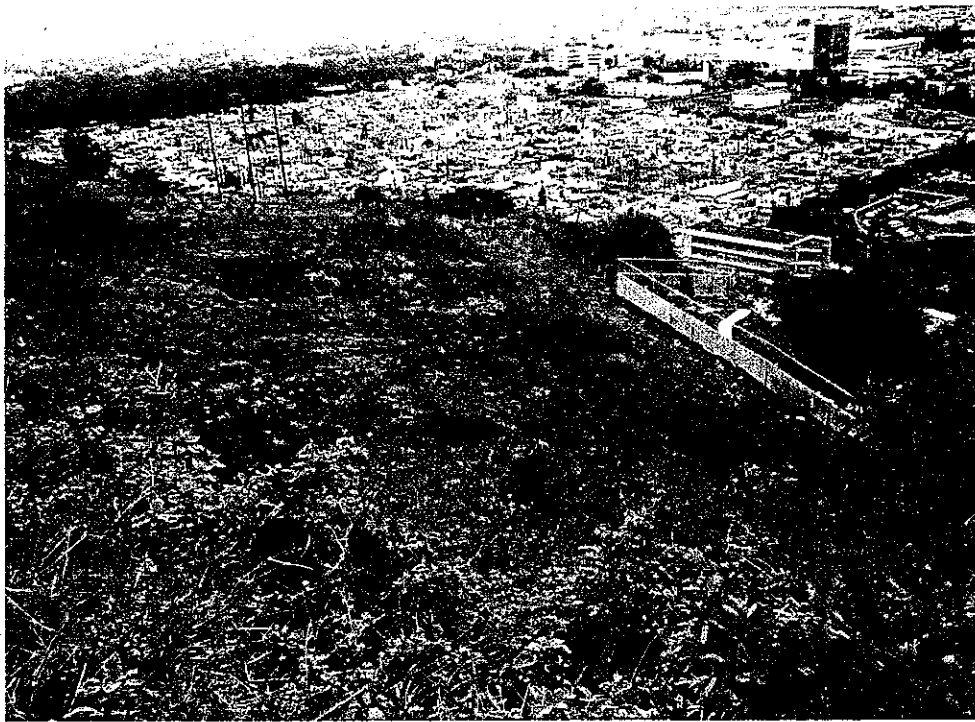






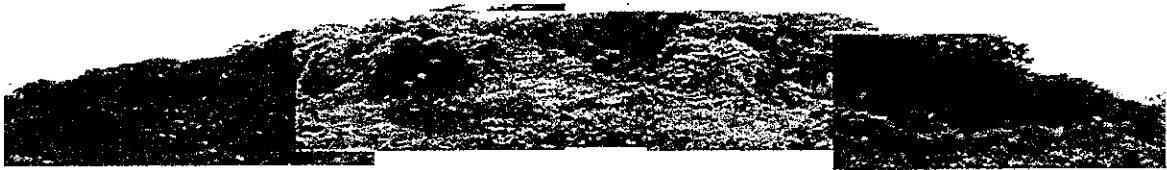








Deslizamiento  
Ocolusen 3







## Deslizamiento

### Ocolusen 4





Deslizamiento  
Cumbres de las Américas

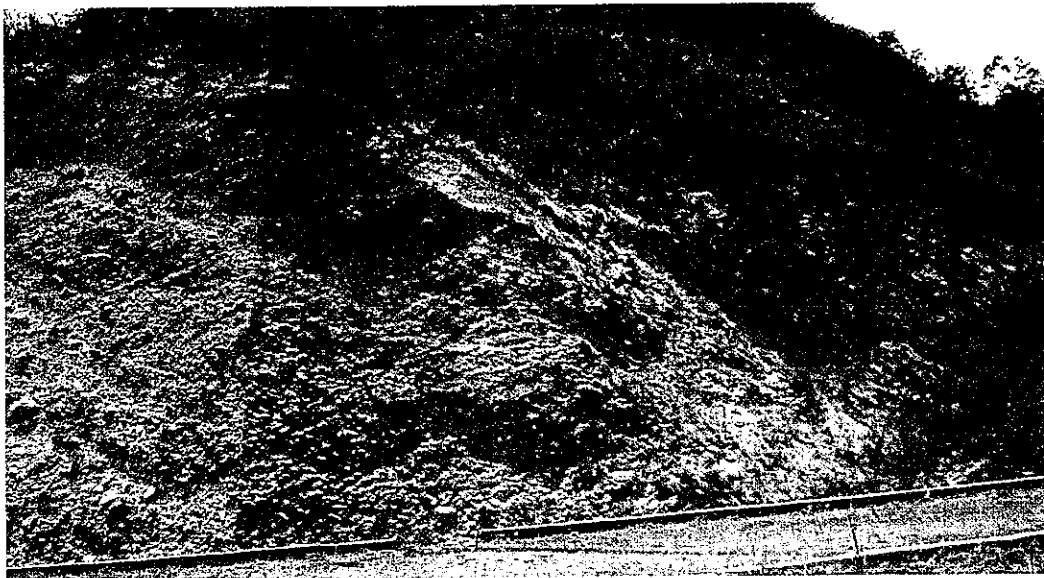


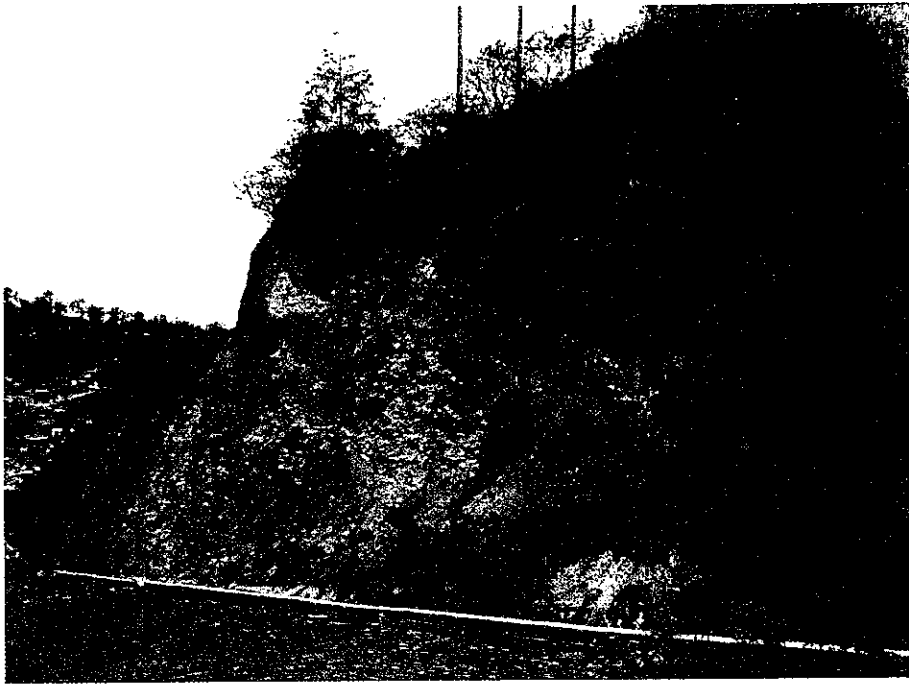


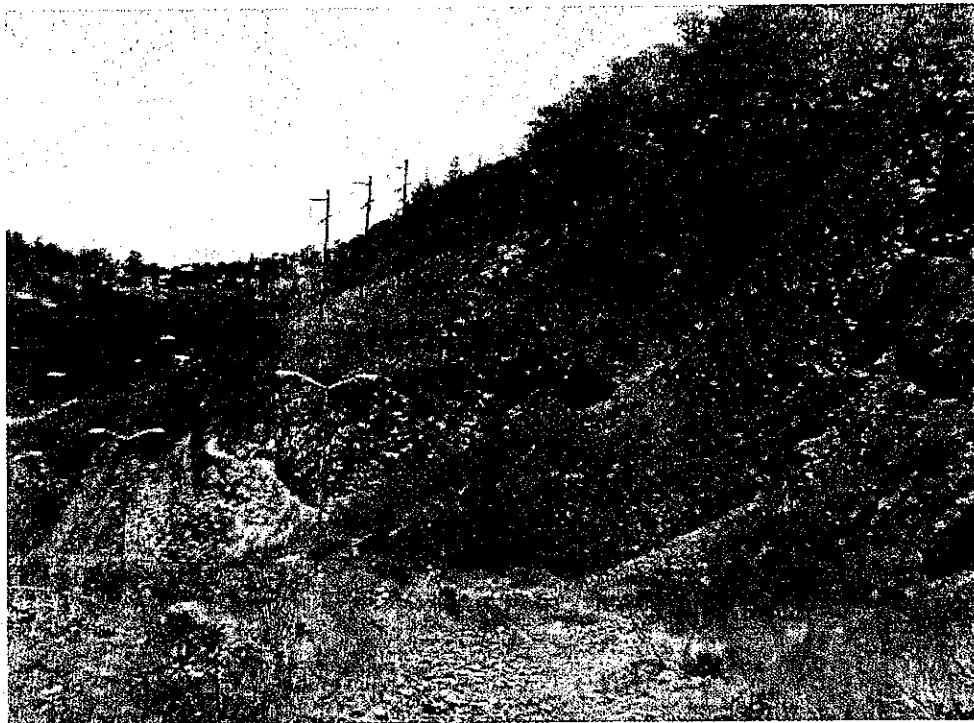


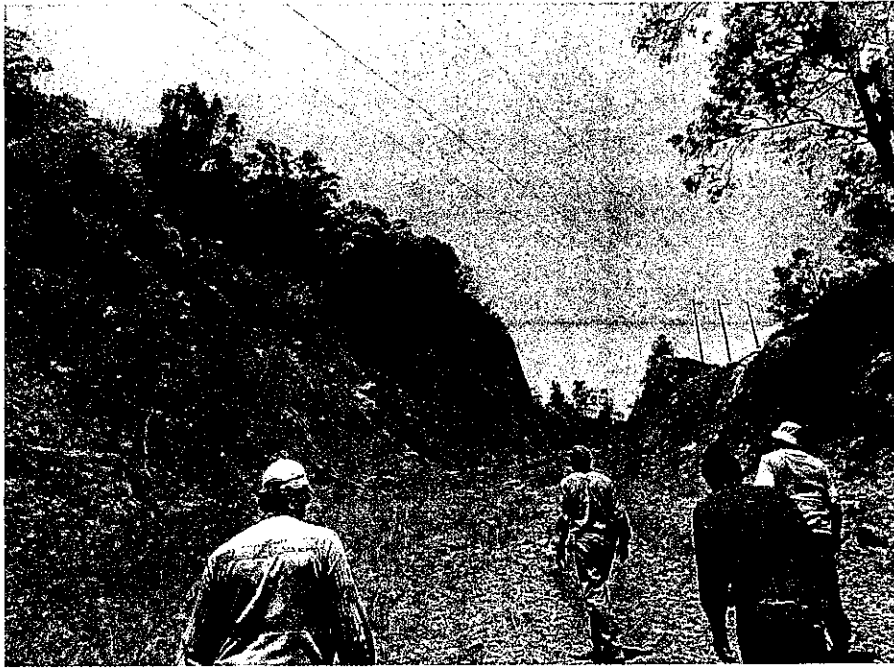




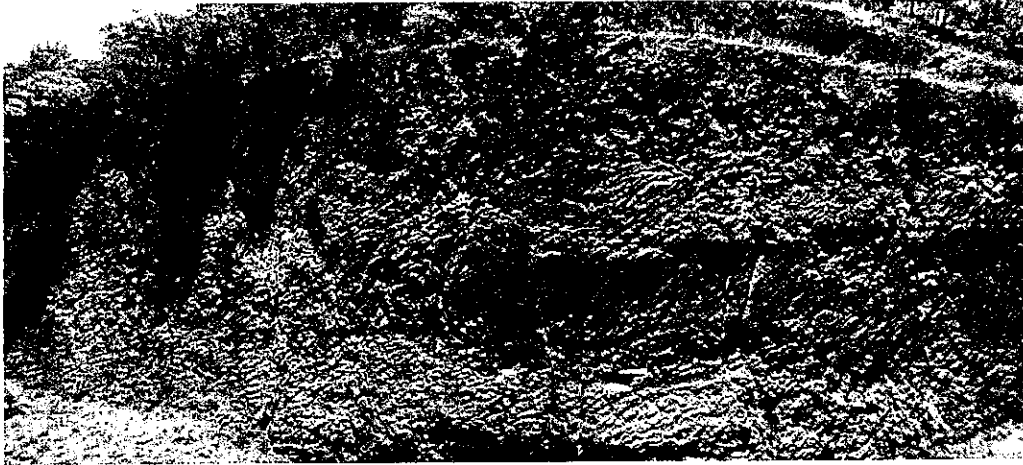














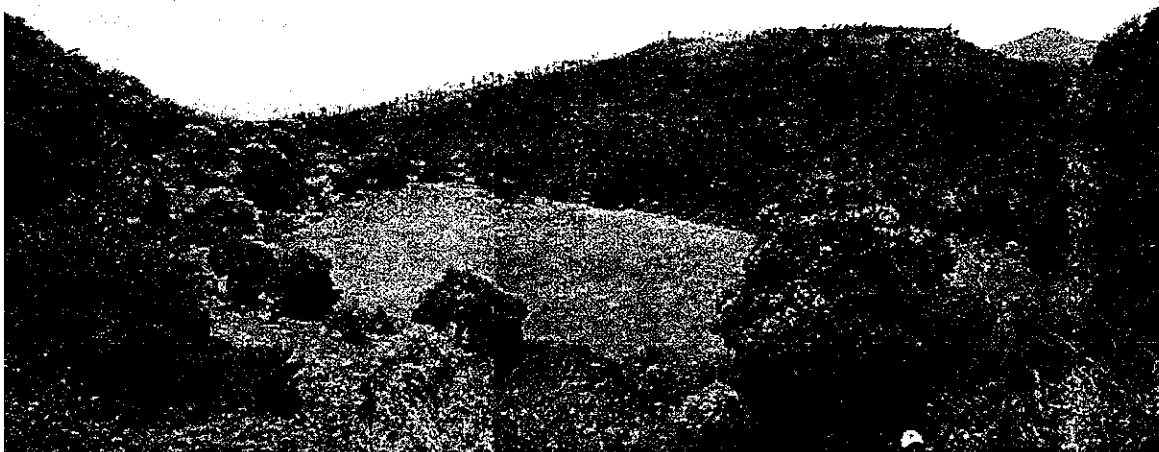
Escalones sobre la ladera de la paloma



## **Deslizamientos**

### Deslizamiento en la zona del Portal de Salida Túnel I

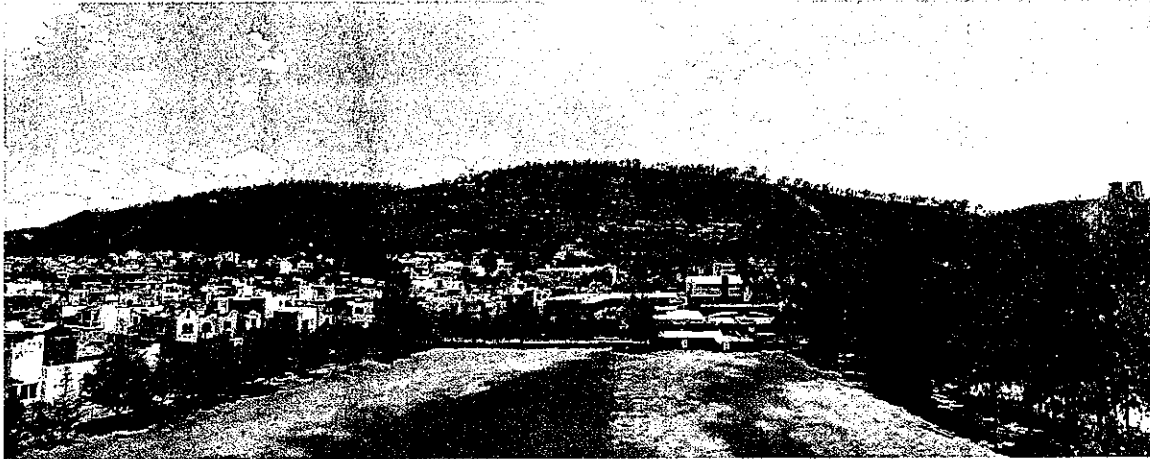






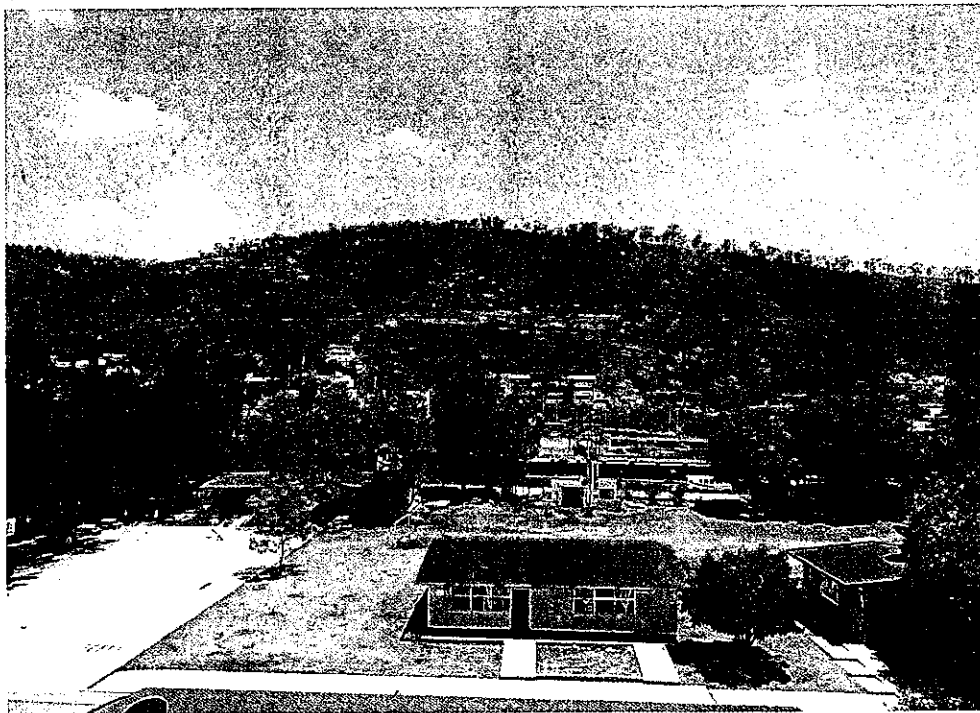
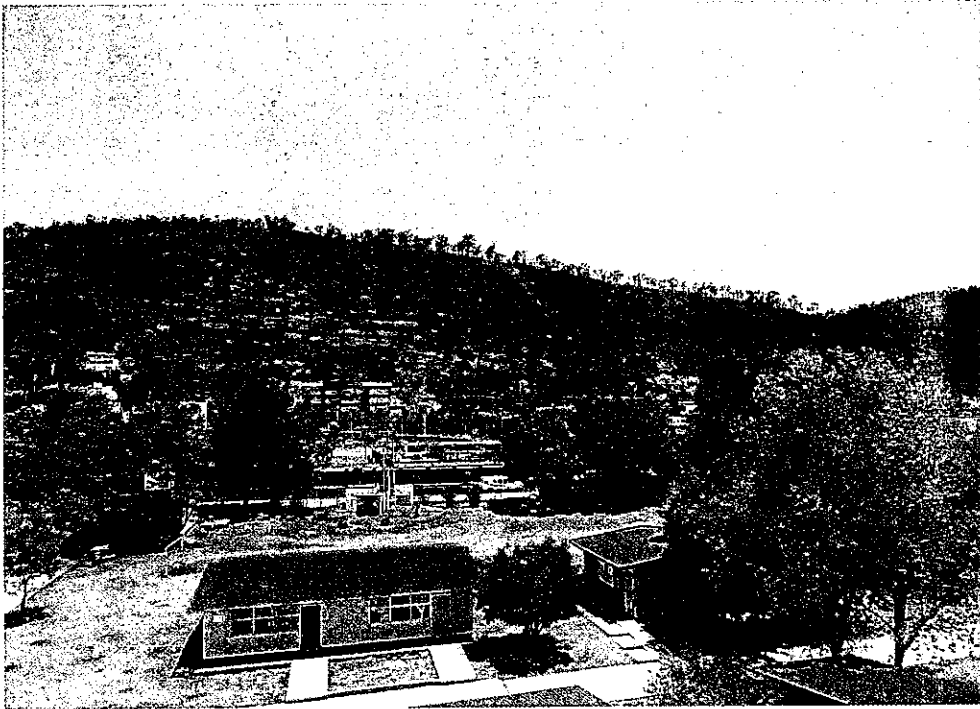


Deslizamientos  
Ocolusen



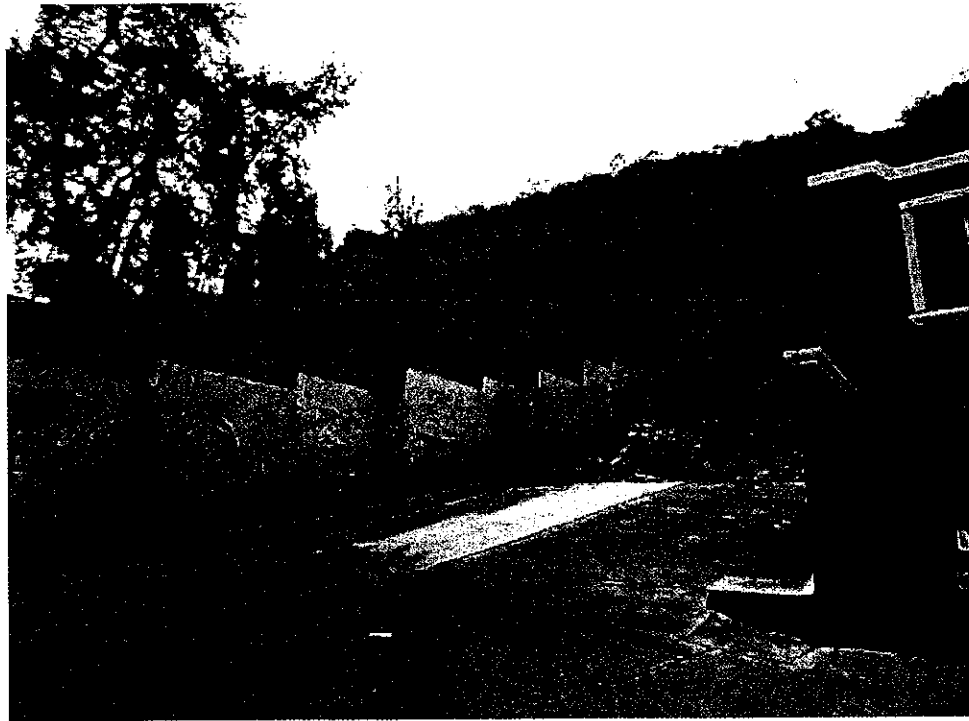








Deslizamiento  
Ocolusen I





**Zona de Portal de Salida  
Túnel I**





**Zona de Portal de Entrada  
Túnel II**







**Zona de Portal de Salida  
Túnel II**





## **Geología estructural**

### **Falla la Paloma**



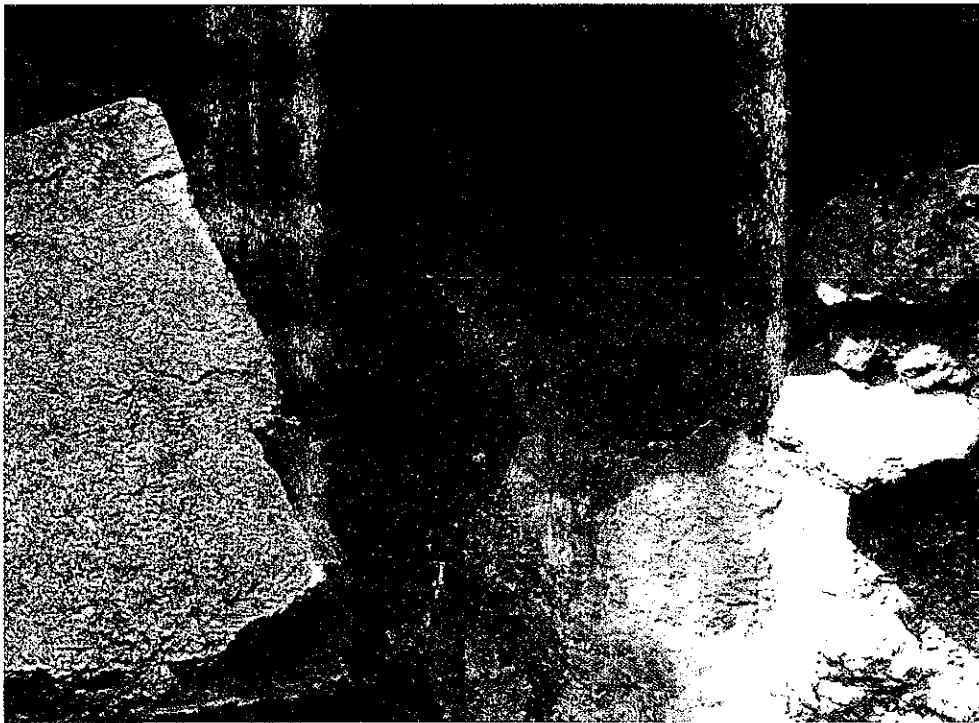


## Falla Altozano





## Falla Seminario









## Fracturas



Figura . Facturas en brechas y derrames andesítico sobre arroyo donde se forma escarpe de unos 4m de altura.

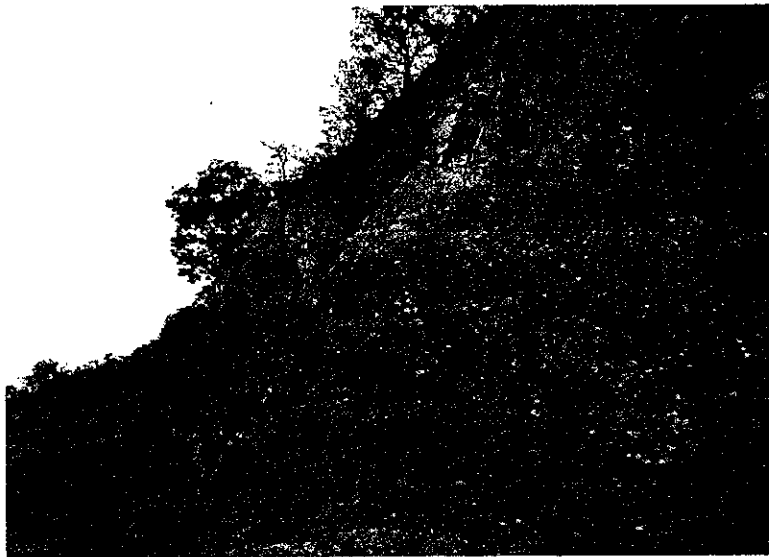


Figura Facturas en brechas y derrames andesítico sobre arroyo donde se forma escarpe de unos 4m de altura.



Escalones sobre la ladera de La Paloma



Escalones sobre la ladera de la paloma



## **Estratigrafía**

Brechas volcánicas, tobas y derrames andesíticos  
(TM bv-an)

Secuencia Inferior



## **ANEXO 3.2**

### **PUNTOS DE VERIFICACIÓN GEOLÓGICA**

**PVG 1 (PORTAL DE ENTRADA-SALIDA DEL TUNEL)**

Ubicación:

X: 274125

Y: 2 177739

En este sitio se tiene un conjunto de materiales heterogéneos, conformados por fragmentos de rocas andesíticas y de brechas volcánicas, no cohesivos, con variaciones en su espesor y con una morfología de abanico.

La unidad se compone de fragmentos angulosos que van de milímetros a bloques mayores a 2 m, originados por una avalancha de escombros como resultado de un flujo de materiales fragmentarios procedente de una zona escarpada donde afloran rocas volcánicas, (brechas volcánicas y andesita) en el bloque de piso de la falla "La Paloma", donde se tienen pendientes promedio de 70°, llegando a ser localmente verticales.

Como producto del reacomodo de estos materiales no compactados, de la pendiente, de la infiltración de agua en temporada de lluvias, del peso de las construcciones y de la circulación vial, se han desarrollado un conjunto de fracturas de tensión que afectan localmente al pavimento y las bardas de las construcciones edificadas sobre los materiales no cohesivos producto de la avalancha, sin embargo la deformación es menor a medida que disminuye el espesor de la avalancha.

**PVG 2 (ESCARPE DE FALLA LA PALOMA)**

Ubicación:

X: 274128

Y: 2177741

Superficie de falla desarrollada sobre una brecha volcánica compuesta por fragmentos de roca angulosos con variaciones de tamaño entre 1 y 30 cm, predominando los menores a 10 cm. Los fragmentos que componen a la brecha volcánica corresponden a una roca de color gris que intemperizan a tonos rojizos.

En la superficie de falla se tiene material cohesivo sobre el que se tienen estrías de falla que siguen la dirección de la línea de máxima pendiente de la falla, con escalones que indican que la falla es normal, con bloque caído al norte, donde se ubica la Ciudad de Morelia, Michoacán.

Dirección de Inclinación e inclinación de la falla:

1. 347° 74°

2. 339° 75°

3. 2° 76°

**PVG 3 (ESCARPE DE FALLA LA PALOMA)**



Ubicación:

X: 274090

Y: 2177710

Afloramiento donde se tiene a la superficie de la falla la Paloma, que se caracteriza por tener material cohesivo sobre la que se tiene desarrollo de estrías y escalones de falla, que indican que la falla es de tipo normal, con bloque de techo hacia el norte.

En el bloque de piso se tiene un conjunto de materiales angulosos con tamaños variables, ya que se tienen bloques de hasta 3 m de diámetro, predominado los menores a 10 cm, que corresponden a una brecha volcánica, cuyos fragmentos son de textura afanítica de color gris, que intemperizan en tonos rojizos.

Dirección de Inclinación e inclinación de la falla:

1.  $347^{\circ} 80^{\circ}$

2.  $349^{\circ} 79^{\circ}$

#### **PVG 4 (ESCARPE DE FALLA LA PALOMA)**

Ubicación:

X: 273956

Y: 2177658

Brechas volcánicas conformadas por fragmentos de rocas andesíticas de textura porfídica, de color gris, con cristales de plagioclasas y olivino en una matriz vítrea. Los fragmentos son angulosos y varían en tamaño, aunque predominan los menores a 10 cm de diámetro.

Sobre la brecha se tiene una superficie de falla, en cuyo entorno se presenta un mayor nivel de cohesión.

Dirección de Inclinación e inclinación de la falla:

1.  $342^{\circ} 74^{\circ}$

2.  $353^{\circ} 75^{\circ}$

#### **PVG 5**

Ubicación:

X: 270773

Y: 2177485

Toba líticapumítica de baja densidad, compuesta de fragmentos de pómez de hasta 4 cm de longitud, de color rosa claro que por intemperismo adquiere color blanco. Se presenta en bloques separados por fracturas de ángulo alto en una zona con inestabilidad en el





terreno, ya que se aprecian zonas de derrumbes con bloques de diversos tamaños en la zona de mayor pendiente. Su contacto inferior es con un conglomerado polimíctico compuesto por fragmentos redondeados y subredondeados de andesitas que se formaron como rellenos de canal en un ambiente fluvial.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $50^{\circ} 76^{\circ}$
2.  $62^{\circ} 85^{\circ}$
3.  $2^{\circ} 75^{\circ}$

### PVG 6

Ubicación:

X: 273704  
Y: 2177457

Toba líticapumítica de baja densidad compuesta de fragmentos angulosos de pómez de hasta 2 cm de longitud. Es una roca de color blanco de muy baja densidad que se conforma de bloques separados por fracturas de ángulo alto.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $145^{\circ} 76^{\circ}$
2.  $265^{\circ} 55^{\circ}$
3.  $335^{\circ} 80^{\circ}$

### PVG 7

Ubicación:

X: 272 991  
Y: 2176425

Ignimbrita o toba lítica compacta de color gris claro que por intemperismo adquiere coloración blanco o rosa claro. Se compone de vidrio con algunos fragmentos líticos y escasos cristales de cuarzo; se presenta con abundantes fracturas. Este punto se localiza en la parte alta de la meseta en la zona de centros comerciales.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $190^{\circ} 83^{\circ}$
2.  $140^{\circ} 85^{\circ}$
3.  $96^{\circ} 69^{\circ}$
4.  $130^{\circ} 18^{\circ}$

### PVG 8



Ubicación:

X: 273743

Y: 2177098

Ignimbrita de color gris claro que por intemperismo cambia a rosa claro, compuesta de vidrio con algunos escasos cristales de cuarzo y fragmentos líticos. Se encuentra próximo al contacto con la unidad de tobas más jóvenes que se encuentran en la parte alta de la meseta y se presenta con abundantes fracturas.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $350^{\circ} 55^{\circ}$

2.  $40^{\circ} 70^{\circ}$

3.  $185^{\circ} 14^{\circ}$

### **PVG 9**

Ubicación:

X: 275280

Y: 2177980

Brecha volcánica con intercalación de derrames de andesita afectadas por abundantes fracturas en el bloque de piso de la falla La Paloma, cuya traza pasa en las proximidades de este afloramiento.

La andesita es de color gris, de textura afanítica, con abundantes vesículas y con un espesor menor de 5 m. Es de color gris oscuro que cambia por intemperismo a tonos rojizos.

La brecha volcánica es volumétricamente la más abundante, se compone de fragmentos angulosos de andesita cuyos tamaños varían desde milímetros a más de 50 cm, predominando los menores a 10 cm. Son de color gris e intemperizan en tonos rojizos.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $145^{\circ} 73^{\circ}$

2.  $115^{\circ} 54^{\circ}$

3.  $342^{\circ} 66^{\circ}$

4.  $20^{\circ} 82^{\circ}$

5.  $210^{\circ} 62^{\circ}$

### **PVG 10**

Ubicación:

X: 275135

Y: 2177867



Depósito con fragmentos angulares de andesita y de brecha volcánica de muy diversos tamaños, siendo los más grandes de hasta 1.5 m. Corresponde con una avalancha de escombros acumulada al pie del talud de la Falla La Paloma, con una morfología de abanico, el cual tiene mayor pendiente en las proximidades de la zona de falla y disminuye hacia la zona de menor relieve hacia el norte. Es una zona con materiales no cohesivos que permite el desarrollo de fracturas locales dentro del abanico, debido a la gravedad, a la infiltración de agua, a la circulación de vehículos y a la carga de las construcciones en la zona habitacional. Es una zona donde ocurre compactación diferencial, lo que ha originado un importante sistema de fracturas de tensión.

### **PVG 11**

Ubicación:

X: 275 228  
Y: 2177784

Brecha volcánica con muy variados fragmentos angulosos de andesita, cuyos tamaños varían de milímetros a 2.0 m de longitud, predominando los que están entre 3 y 20 cm. Presenta algunas intercalaciones de derrames de andesita de textura afanítica con espesores de 3 a 7 m. La roca en fresco es de color gris oscuro que cambia por intemperismo a tonos rojizos.

Presenta numerosas fracturas abiertas con longitudes superiores a los 15 metros, son de ángulo alto, abertura hasta de 25 cm y con espaciamiento entre 1 y 4 metros.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1. 385° 80°

### **PVG 12**

Ubicación:

X: 275 089  
Y: 2177596

Brecha volcánica con algunas intercalaciones de derrames de andesita. La brecha se compone de fragmentos angulosos de andesita de color gris oscuro que cambia por intemperismo a tonos rojizos. La andesita es de textura afanítica de color gris oscuro.

### **PVG 13**

Ubicación:

X: 273644  
Y: 2176405



Ignimbrita de color gris claro con algunos cristales de cuarzo y fragmentos líticos, que por intemperismo adquiere tonalidades rojizas y amarillentas. Es la unidad que se encuentra en la parte alta de la meseta donde se ubica la zona comercial, en una zona de baja pendiente.

Presenta abundantes fracturas rellenas de óxido de hierro, con apertura entre 2 y 6 cm.

En este sitio iniciaría la construcción del tramo carretero que comunicaría a la zona comercial de la meseta con la ciudad de Morelia.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $85^{\circ} 46^{\circ}$
2.  $290^{\circ} 86^{\circ}$
3.  $110^{\circ} 74^{\circ}$
4.  $45^{\circ} 78^{\circ}$

#### **PVG 14**

Ubicación:

X: 274003  
Y: 2176262

Ignimbrita de color gris claro con algunos cristales de anfíboles metidos en una matriz vítrea; presenta fracturamiento. El afloramiento es de reducidas dimensiones y está cubierto por suelo.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $244^{\circ} 54^{\circ}$

#### **PVG 15**

Ubicación:

X: 274210  
Y: 2176111

Toba lítica pumíticaque por intemperismo cambia a blanco, siendo este el color que predomina, ya que se presenta fuertemente alterada. Presenta textura fina, con vidrio y algunos cristales de anfíboles.

La zona tiene un amplio desarrollo de vegetación y una capa de suelo que es lo que predomina superficialmente en las inmediaciones de la parada.

#### **PVG16**



Ubicación:

X: 274188

Y: 2176178

Toba lítica pumíficade color blanco producto del intemperismo, aunque las partes menos alteradas se observan algunos cristales de cuarzo. En algunas partes se observa de color rojizo por el intemperismo.

Se presenta en afloramientos aislados ya que hay abundante desarrollo de vegetación con una cubierta de suelo.

### **PVG 17**

Ubicación:

X: 274136

Y: 2176275

Toba lítica pumíficade color gris claro que intemperiza a blanco o en tonos rojizos. Se compone de vidrio con algunos cristales de cuarzo.

La roca se presenta muy alterada, con afloramientos aislados ya que hay desarrollo de suelo y abundante vegetación.

### **PVG 18**

Ubicación:

X: 274191

Y: 2176439

Ignimbrita de color gris claro que intemperiza a blanco o a rojo claro, se compone de vidrio con algunos cristales de cuarzo.

Se presenta en afloramientos de reducidas dimensiones, dado que hay una importante cubierta de suelo y abundante vegetación

### **PVG 19**

Ubicación:

X: 274439

Y: 2176505



Ignimbrita (toba soldada) de color gris claro que intemperiza a rosa claro y blanco, presenta algunos cristales de cuarzo en una matriz vítrea.

Los afloramientos son aislados y de reducidas dimensiones, considerando la abundante vegetación y la cubierta de suelo.

### **PVG 20**

Ubicación:

X: 274472

Y: 2176452

Pozo a Cielo Abierto (PCA), de aproximadamente 1x1x1 m, excavado en suelo sin llegar a la roca.

El punto corresponde a la unidad de ignimbritas.

### **PVG 21**

Ubicación:

X: 274556

Y: 2176533

Fragmentos angulosos de muy diversos tamaños (de centímetros a bloques de más de 3m), de ignimbritas de color gris claro que intemperizan a rosa claro y blanco.

Este punto corresponde a la terraza superior del conjunto de tres derrumbes ocasionados en tiempos diferentes como flujos de escombros en las zonas de alta pendiente de las ignimbritas fracturadas.

Se caracteriza por una morfología de abanicos, típicos de las avalanchas de escombros de las zonas inestables con alta pendiente. Presenta una zona plana de dimensiones considerables y en su parte final una fuerte pendiente en el frente de la avalancha.

Es una zona con materiales inestables que pueden desplazarse en el futuro por la fuerte pendiente del terreno y por la infiltración de agua. Presenta condiciones favorables para el desarrollo de grietas de tensión.

### **PVG 22**

Ubicación:

X: 274869

Y: 2176566

Brecha volcánica conformada por fragmentos angulosos de andesita con algunas intercalaciones de derrames de andesita de reducido espesor (2-5 m).



Las rocas son de color gris oscuro que intemperizan en tonos rojizos.

Este sitio se ubica en el entorno de una zona de alta pendiente con afloramientos en la parte topográfica alta que implican un eminente riesgo de derrumbes mediante avalanchas de escombros.

### PVG 23

Ubicación:

X: 275024

Y: 2176598

Sobre el lecho del Río Chiquito aflora un derrame de andesitas de color gris oscuro que intemperizan en tonos rojizos.

La roca es de textura porfídica con cristales de plagioclasas y olivino en una matriz de vidrio. Se presenta intensamente fracturada, sin embargo es evidente la buena calidad para la construcción de una obra de ingeniería civil, dada su alta cohesión.

Se presenta en contacto con una secuencia de brechas volcánicas andesíticas conformada por fragmentos angulosos con longitudes entre 2 y 20 cm de longitud. Presenta intercalados derrames de andesitas de reducidas dimensiones.

Este sitio se encuentra en la parte baja de una zona de riesgo por derrumbes que pueden ocasionar avalanchas de escombros.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1. 310° 80°

2. 65° 70°

3. 340° 55°

### PVG 24

Ubicación:

X: 275044

Y: 2176778

Andesita de textura afanítica con muy pocos cristales de plagioclasa y olivino, cubierta por una brecha volcánica conformada de fragmentos de andesita de hasta 20cm. De longitud, predominando los fragmentos entre 2 y 5 cm de longitud. La roca es de color gris e intemperiza en color rojizo.

La andesita se presenta intensamente fracturada.

**PVG 25**

Ubicación:

X: 274927

Y: 2176921

Brecha volcánica formada de fragmentos angulosos de 2 a 20 cm de longitud de andesita. Son fragmentos de color gris que intemperizan a color rojizo en cuyo entorno hay una excavación (cueva) que muestra la buena calidad del material para la construcción de obras de ingeniería civil.

**PVG 26**

Ubicación:

X: 274686

Y: 2176994

Brecha volcánica con fragmentos de andesita de hasta 20 cm de longitud, predominando los de 2-8 cm. Presenta intercalaciones de derrames de andesita de textura afanítica, con muy pocos cristales de olivino; es un cuerpo de reducidas dimensiones.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $214^{\circ} 82^{\circ}$ 2.  $350^{\circ} 58^{\circ}$ **PVG 27**

Ubicación:

X: 274847

Y: 2177149

Ignimbrita que se presenta en bloques de hasta 2 m. de largo, que se encuentran únicamente en la zona de mayor relieve; son rocas de color gris claro que intemperiza en tonos de rosa claro y blanco. Es un afloramiento que muestra una delgada capa de toba soldada de reducidas dimensiones sobrepuesta a la unidad formada por brechas y derrames andesíticos.

**PVG 28**

Ubicación:

X: 274648

Y: 2177387





Afloramiento de un derrame de andesitas de color gris oscuro con algunos cristales de olivino, que se encuentra intercalado en una secuencia de brechas volcánicas formadas por fragmentos angulosos de andesita de hasta 25 cm. de longitud.

No se tienen afloramientos continuos, dado el buen desarrollo de suelo y la abundante vegetación.

### PVG 29

Ubicación:

X: 274591

Y: 2177732

Capa de suelo con muchos fragmentos de andesita.

### PVG 30

Ubicación:

X: 274400

Y: 2176969

Brechas volcánicas con fragmentos angulosos de andesitas con tamaños de milímetros a 30 de longitud, intercalados con derrames de andesitas de hasta 7 m de espesor. Las rocas son de textura porfídica con cristales de feldespatos y olivino.

El afloramiento presenta intenso fracturamiento, el cual es más evidente en donde se tiene a las andesitas.

Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1. 170° 16°

2. 220° 57°

3. 275° 88°

### PVG 31

Ubicación:

X: 274208

Y: 2177167

Derrame de andesitas intercaladas con brechas volcánicas. En este sitio predomina en la parte inferior la andesita. Las brechas tienen tamaños de bloques de hasta 40 cm de longitud, aunque predominan los de 2 a 7 cm. La andesita es de textura afanítica con muy pocos microcristales de feldespatos y olivino.

Son rocas de color gris oscuro que intemperizan en colores rojizos que presentan intenso fracturamiento.



Dirección de Inclinación e inclinación de fracturas:

1.  $235^{\circ} 16^{\circ}$
2.  $150^{\circ} 80^{\circ}$
3.  $75^{\circ} 78^{\circ}$



### **Anexo 3.3**

## **Algunos parámetros utilizados en la descripción del Macizo Rocoso**



Tomado de González de Vallejo et. al., 2002.

**CUADRO 4.1**

**Características y propiedades a describir en campo para la caracterización del macizo rocoso**

Ámbito de estudio	Característica o propiedad	Método	Clasificación
Matriz rocosa	Identificación.	Observaciones de visu y con lupa.	Clasificación geológica y geotécnica.
	Meteorización.	Observaciones de visu.	Índices estándar.
	Resistencia.	Índices y ensayos de campo.	Clasificaciones empíricas de resistencia.
Discontinuidades	Orientación.	Medida directa con brújula de geólogo.	
	Espaciado.	Medidas de campo.	Índices y clasificaciones estándar.
	Continuidad.		
	Rugosidad.	Observaciones y medidas de campo.	Comparación con perfiles estándar.
	Resistencia de las paredes.	Martillo Schdmít. Índices de campo.	Clasificaciones empíricas de resistencia.
	Apertura.		
	Relleno.	Observaciones y medidas de campo.	Índices estándar.
Macizo rocoso	Filtraciones.		
	Número de familias de discontinuidades.		
	Tamaño de bloque.	Medidas de campo.	Índices y clasificaciones estándar.
	Intensidad de fracturación.		
	Grado de meteorización.	Observaciones de campo.	Clasificaciones estándar.

**CUADRO 4.3**

**Clasificación del tamaño de grano de las rocas**

Descripción.	Tamaño del grano	Equivalencia con los tipos de suelos
Grano grueso	> 2 mm	Gravas
Grano medio	0,06-2 mm	Arenas
Grano fino	< 0,06 mm	Limos y arcillas



CUADRO 4.4

## Descripción del grado de meteorización

Término	Descripción
Fresca	No se observan signos de meteorización en la matriz rocosa.
Decolorada	Se observan cambios en el color original de la matriz rocosa. Es conveniente indicar el grado de cambio. Si se observa que el cambio de color se restringe a tipo o algunos minerales, se debe mencionar.
Desintegrada	La roca se ha alterado al estado de un suelo, manteniéndose la fábrica original. La roca es friable, pero los granos minerales no están descompuestos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos.

CUADRO 4.13

## Evaluación del grado de meteorización del macizo rocoso

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en un suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

(ISTRM, 1981).



CUADRO 3.7

Estimación aproximada y clasificación de la resistencia a compresión simple de suelos y rocas a partir de índices de campo

Clase	Descripción	Identificación de campo	Aproximación al rango de resistencia a compresión simple (MPa)
$S_1$	Arcilla muy blanda	El puño penetra fácilmente varios cm.	< 0,025
$S_2$	Arcilla débil	El dedo penetra fácilmente varios cm.	0,025-0,05
$S_3$	Arcilla firme	Se necesita una pequeña presión para hincar el dedo.	0,05-0,1
$S_4$	Arcilla rígida	Se necesita una fuerte presión para hincar el dedo.	0,1-0,25
$S_5$	Arcilla muy rígida	Con cierta presión puede marcarse con la uña.	0,25-0,5
$S_6$	Arcilla dura	Se marca con dificultad al presionar con la uña.	> 0,5
$R_0$	Roca extremadamente blanda	Se puede marcar con la uña.	0,25-1,0
$R_1$	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo. Con una navaja se talla fácilmente.	1,0-5,0
$R_2$	Roca blanda	Se talla con dificultad con una navaja. Al golpear con la punta del martillo se producen pequeñas marcas.	5,0-25
$R_3$	Roca moderadamente dura	No puede tallarse con la navaja. Puede fracturarse con un golpe fuerte del martillo.	25-50
$R_4$	Roca dura	Se requiere más de un golpe con el martillo para fracturarla.	50-100
$R_5$	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla.	100-250
$R_6$	Roca extremadamente dura	Al golpearlo con el martillo sólo saltan esquirlas.	> 250

(ISRM, 1981)

CUADRO 4.6

Descripción del espaciado

Descripción	Espaciado
Extremadamente junto	< 20 mm
Muy junto	20-60 mm
Junto	60-200 mm
Moderadamente junto	200-600 mm
Separado	600-2.000 mm
Muy separado	2.000-6.000 mm
Extremadamente separado	> 6.000 mm



CUADRO 4.7

## Descripción de la continuidad

Continuidad	Longitud
Muy baja continuidad	< 1 m
Baja continuidad	1-3 m
Continuidad media	3-10 m
Alta continuidad	10-20 m
Muy alta continuidad	> 20 m

(ISRM, 1981).

CUADRO 4.8

## Descripción de la abertura

Abertura	Descripción
< 0.1 mm	Muy cerrada
0.1-0.25 mm	Cerrada
0.25-0.5 mm	Parcialmente abierta
0.5-2.5 mm	Abierta
2.5-10 mm	Moderadamente ancha
> 10 mm	Ancha
1-10 cm	Muy ancha
10-100 cm	Extremadamente ancha
> 1 m	Cavernosa

(ISRM, 1981).



**ANEXO 4.1**  
**MEMORIA FOTOGRAFICA ESTUDIO SISMICO**





FOTO 1. EQUIPO DE SISMICA DE REFRACCION DURANTE LA EJECUCION DEL TENDIDO 2

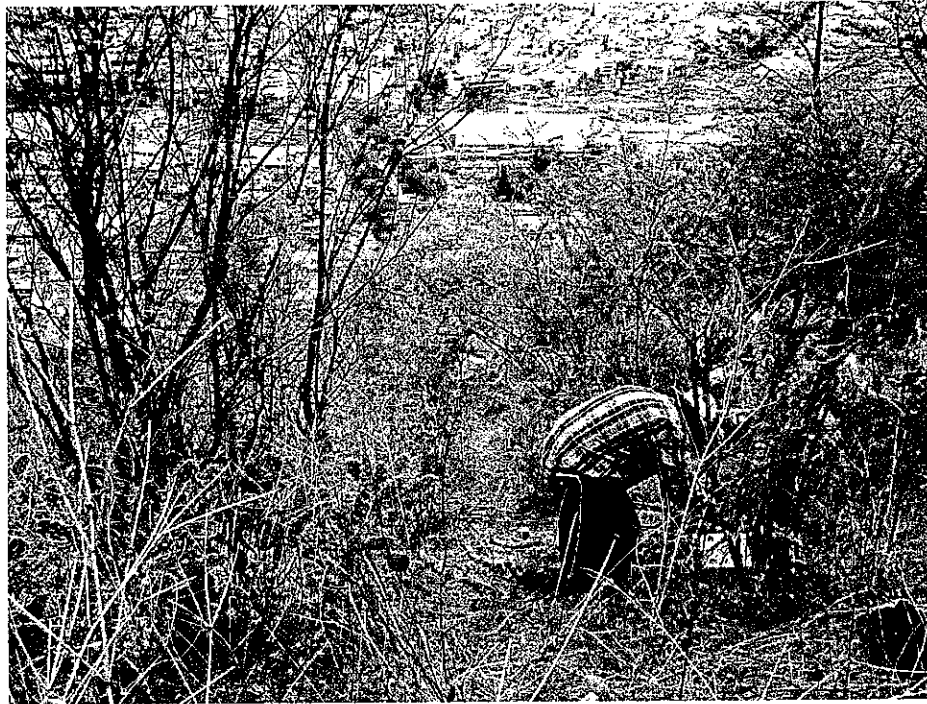


FOTO 2. INSTRUMENTACION Y EJECUCION DEL TENDIDO 4

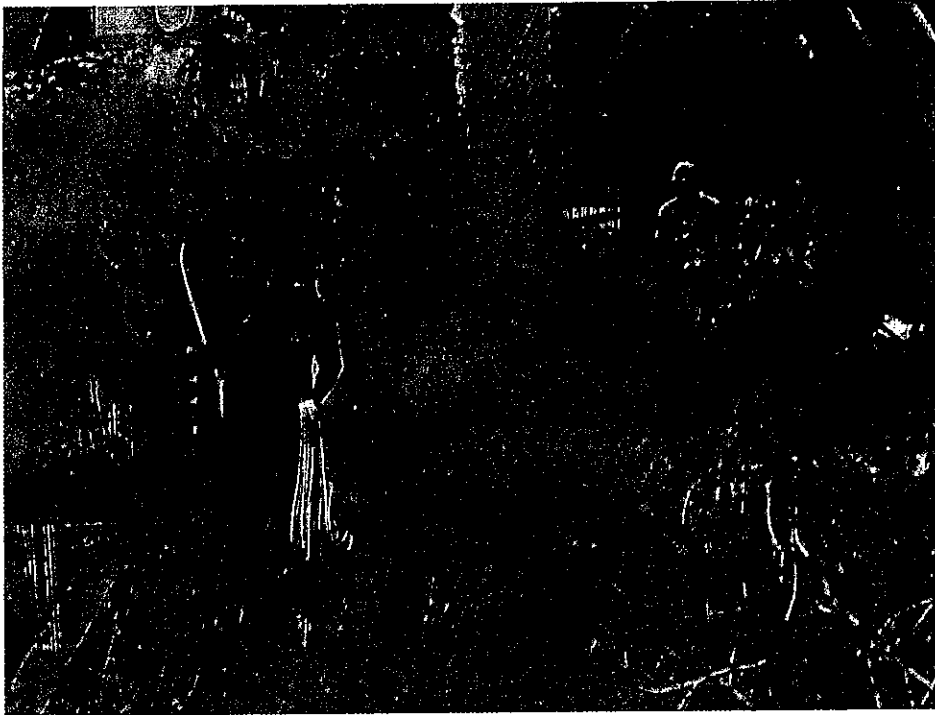


FOTO 3. COLOCACION DEL TENDIDO 5, UBICADO DENTRO DE LA UNIVERSIDAD

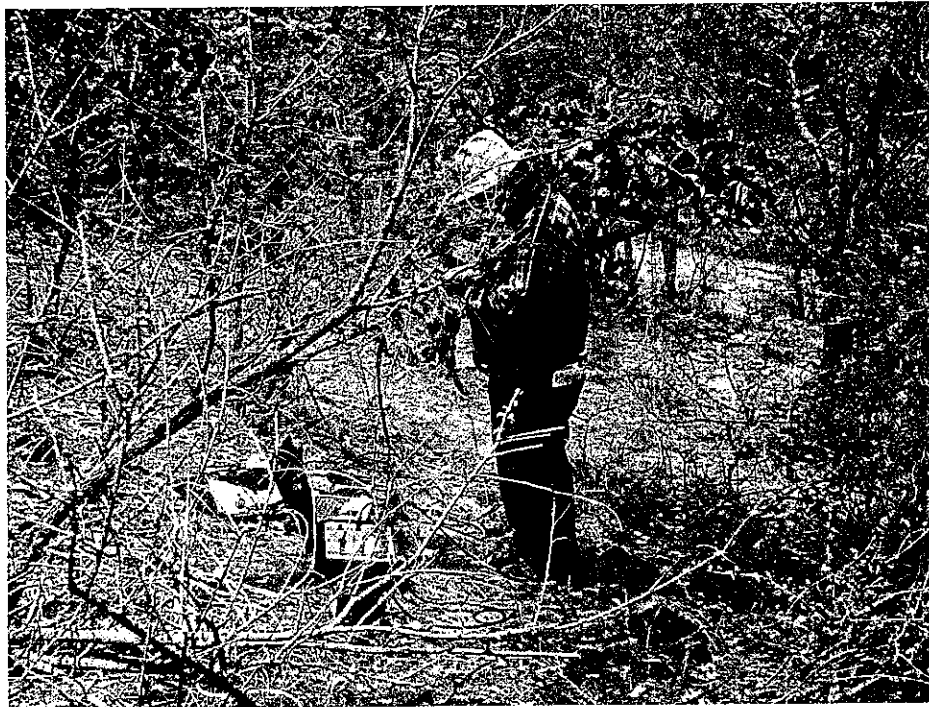


FOTO 4. VISTA DEL EQUIPO DE SISMICA DURANTE LA EJECUCION DEL TENDIDO 8



FOTO 5. VISTA DE LA COLOCACION DE CABLE DE GEOFONOS EN EL TENDIDO 9



FOTO 6. COLOCACION DE LOS GEOFONOS PARA LA EJECUCION DEL TENDIDO 11



FOTO 7. VISTA DEL EQUIPO DE SISMICA DE REFRACCION



FOTO 8. OBTENCION DE DATOS DURANTE LA EJECUCION DEL TENDIDO 15



FOTO 9. VISTA DE LA COLOCACION DEL CABLE DE GEOFONOS EN TENDIDO 19



FOTO 10. VISTA DEL EQUIPO DE SISMICA DE REFRACCION EN TENDIDO 23



FOTO 11. PENDIENTE DEL TERRENO EN TENDIDO 9



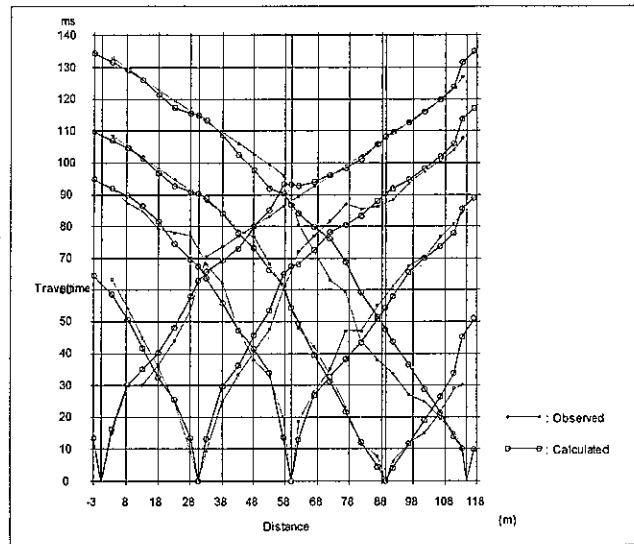
FOTO 12. GOLPE A LA PLACA DE ALUMINIO EN EL TENDIDO 29.



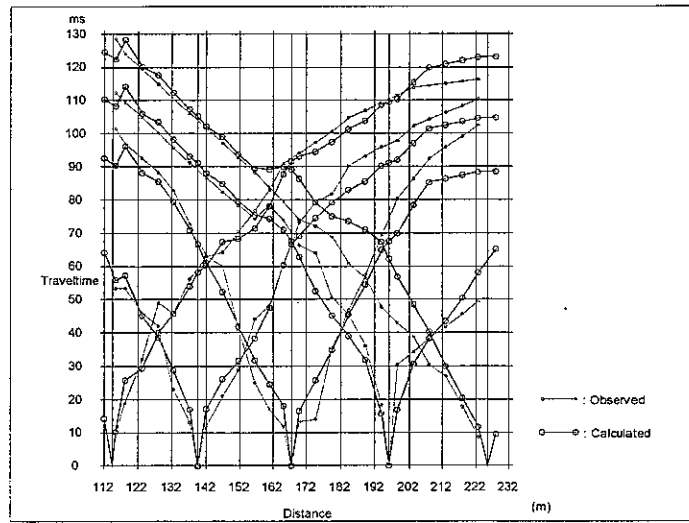
**ANEXO 4.2**  
**PROCESAMIENTO SISMICO**  
**(DROMOCRONICAS)**



### DROMOCRÓNICAS

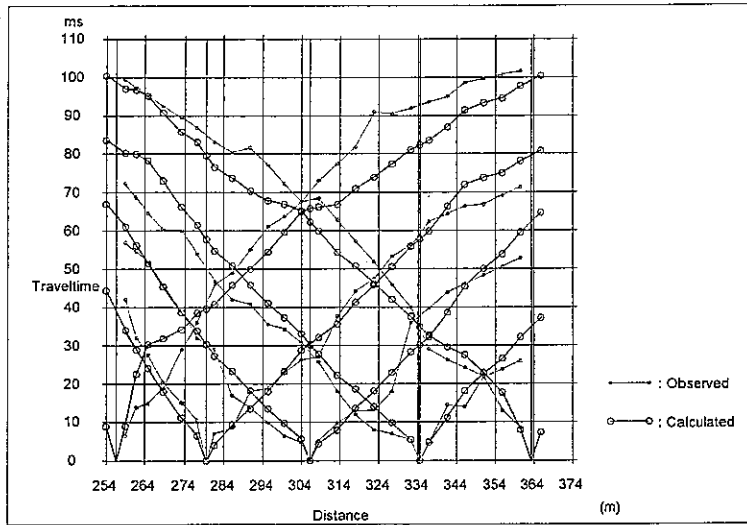


### Tendido No.1

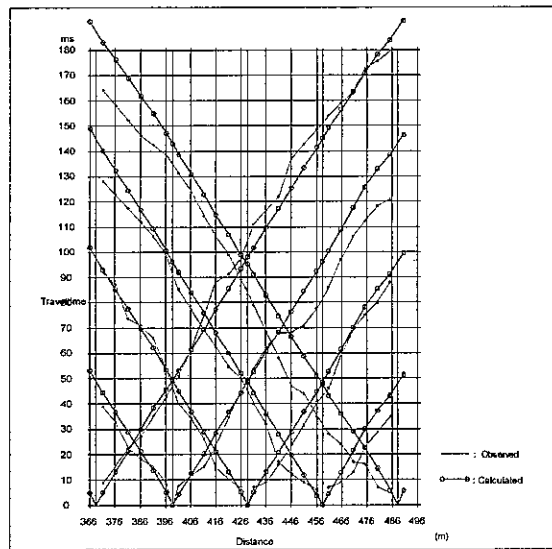


### Tendido No.2

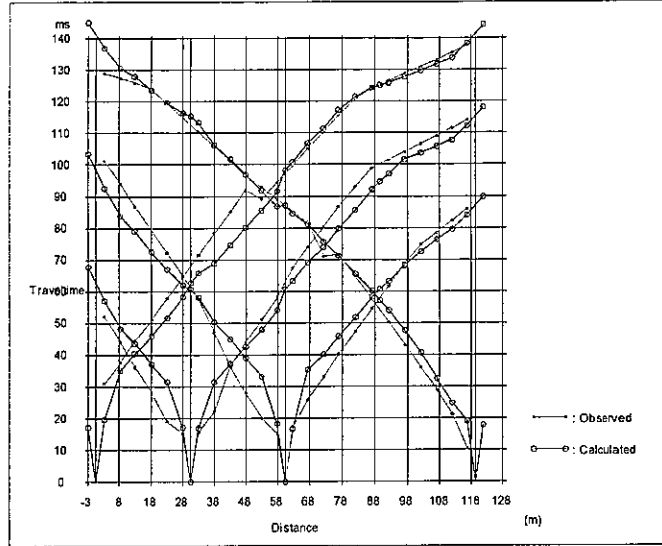




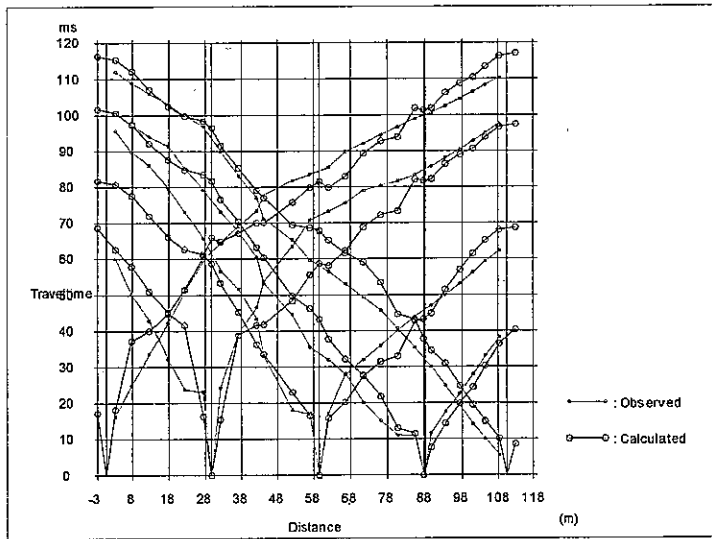
Tendido No.3



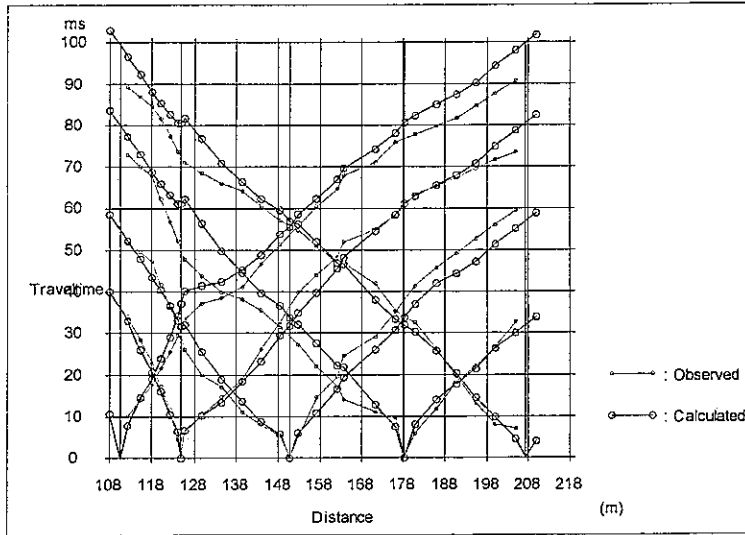
Tendido No.4



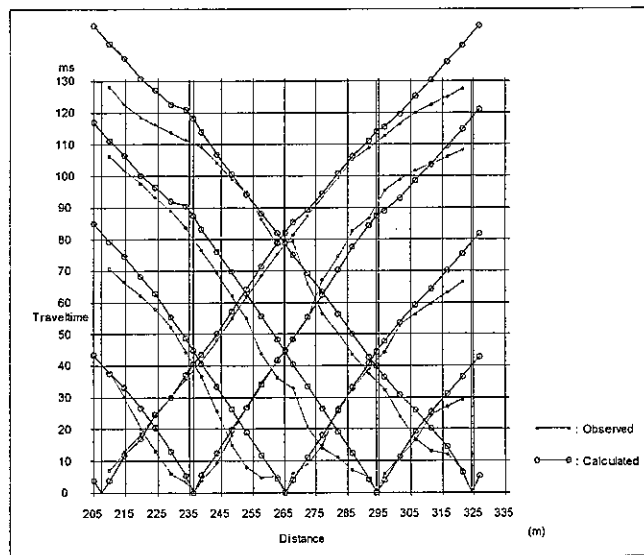
Tendido No.5



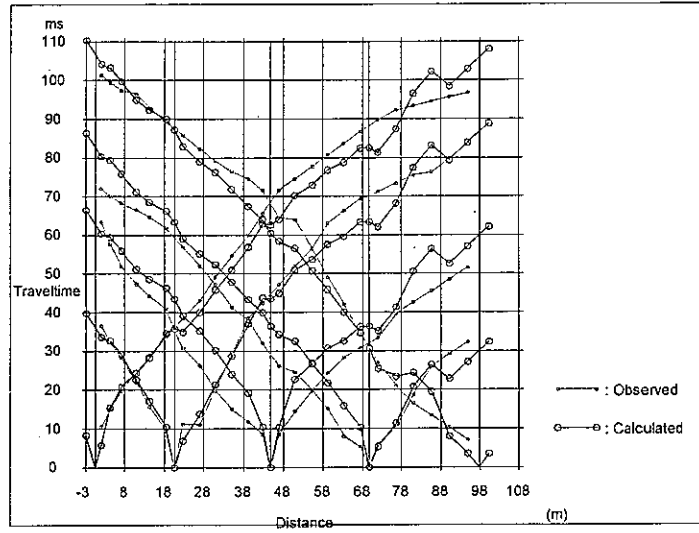
Tendido No.6



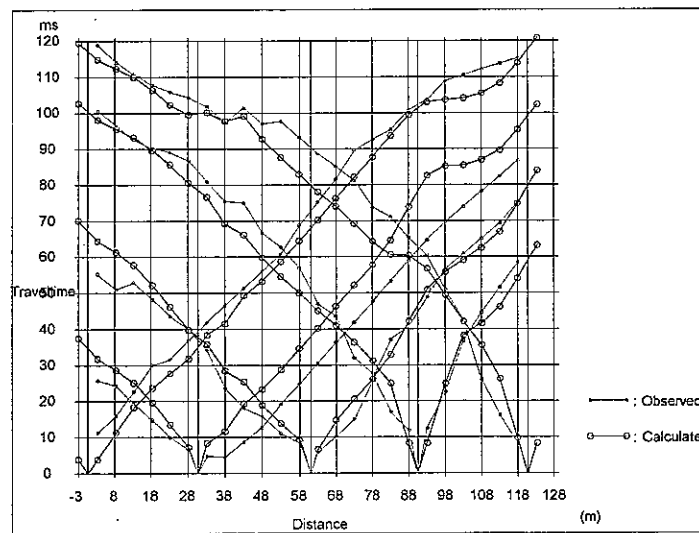
Tendido No.7



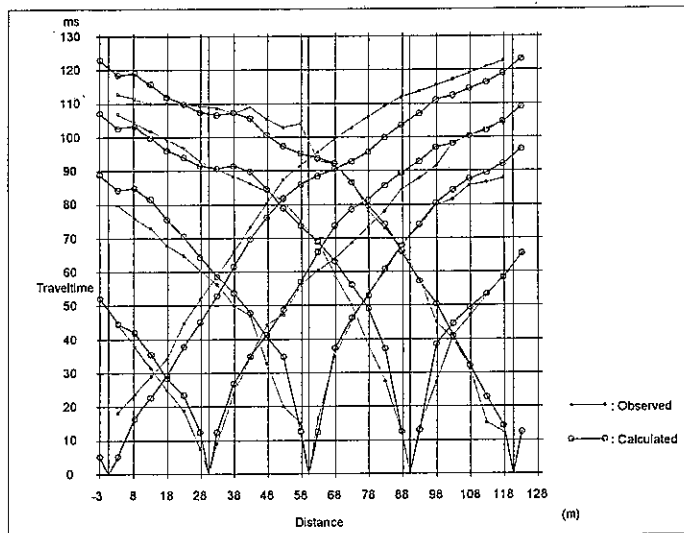
Tendido No.8



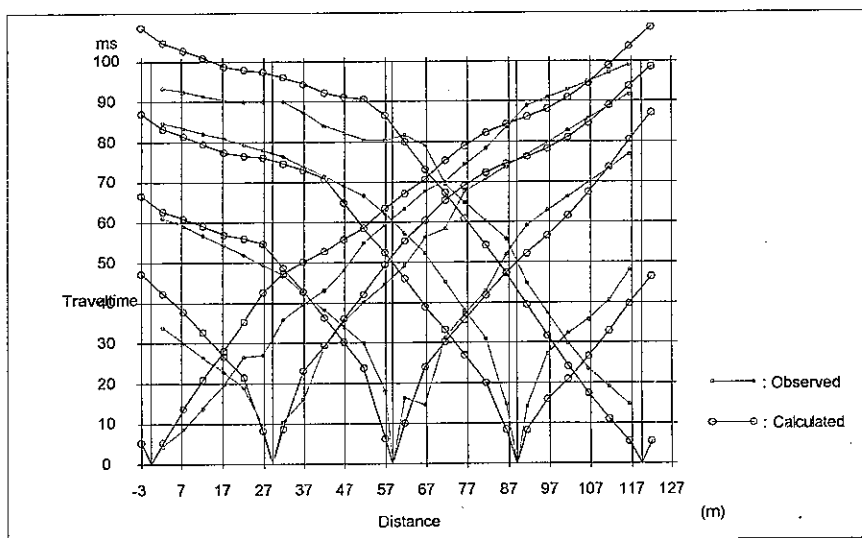
Tendido No.9



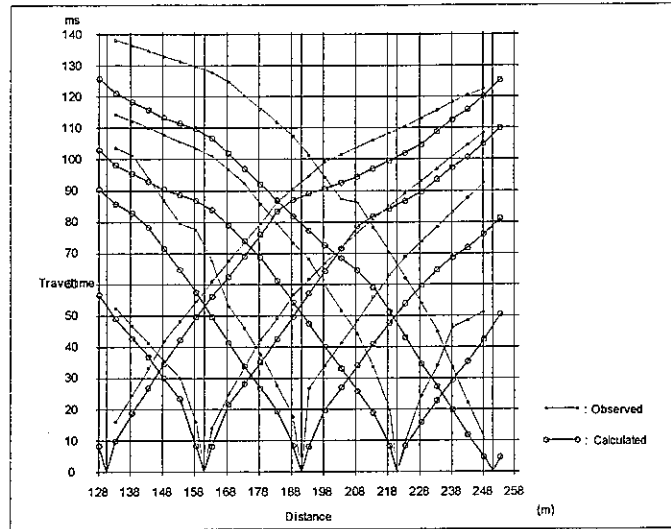
Tendido No.10



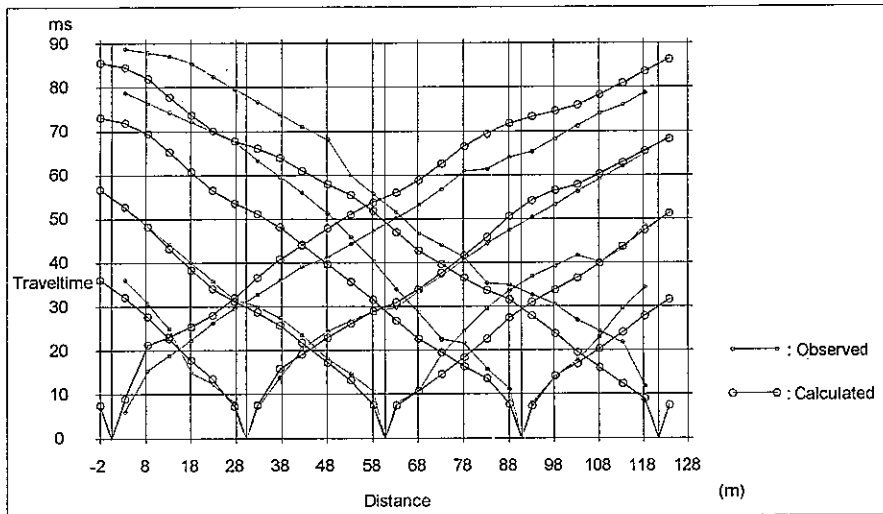
Tendido No.11



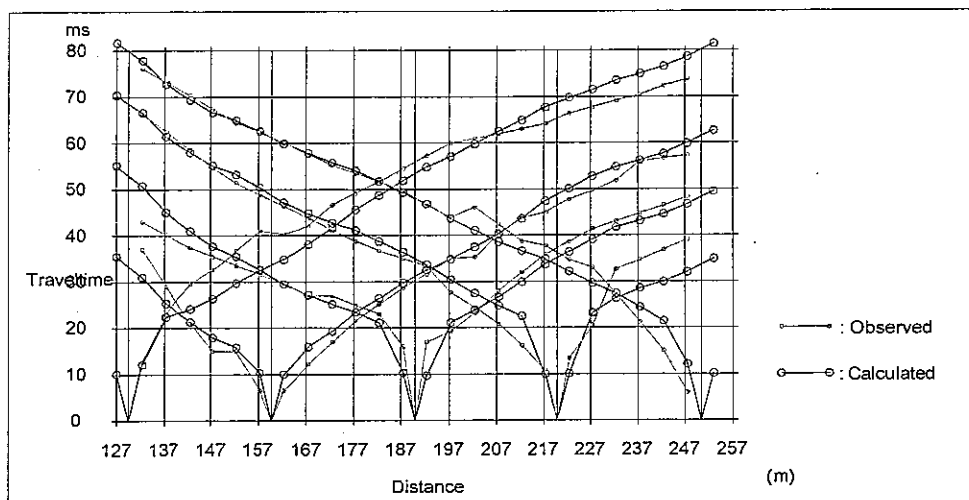
Tendido No.12



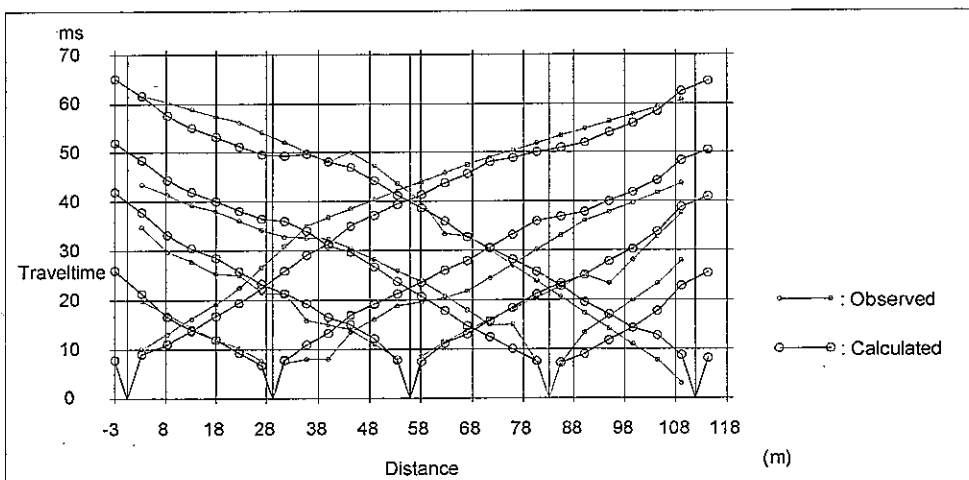
Tendido No.13



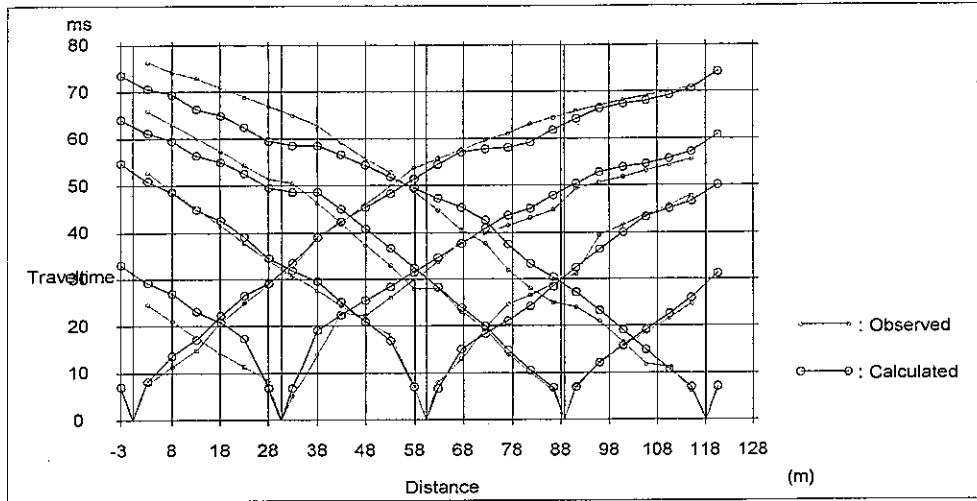
Tendido No.14



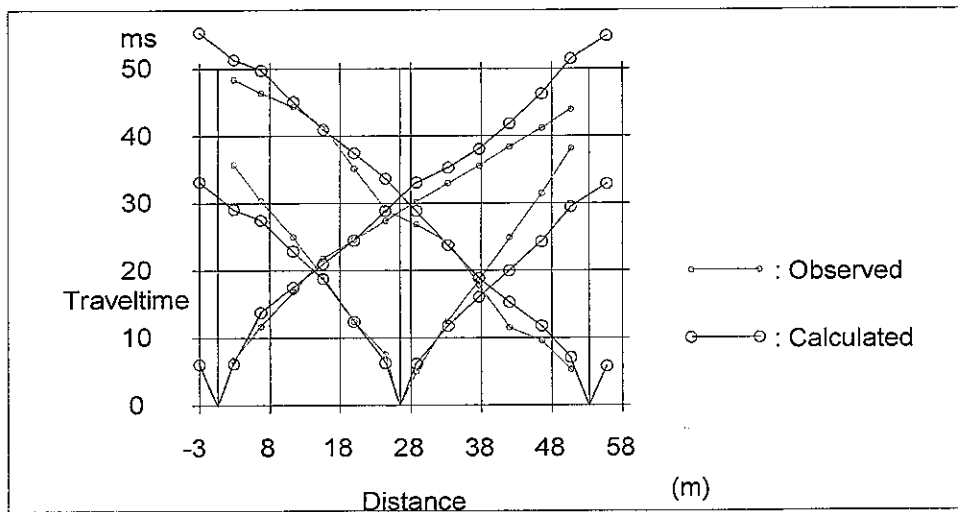
**Tendido No.15**



**Tendido No.16**

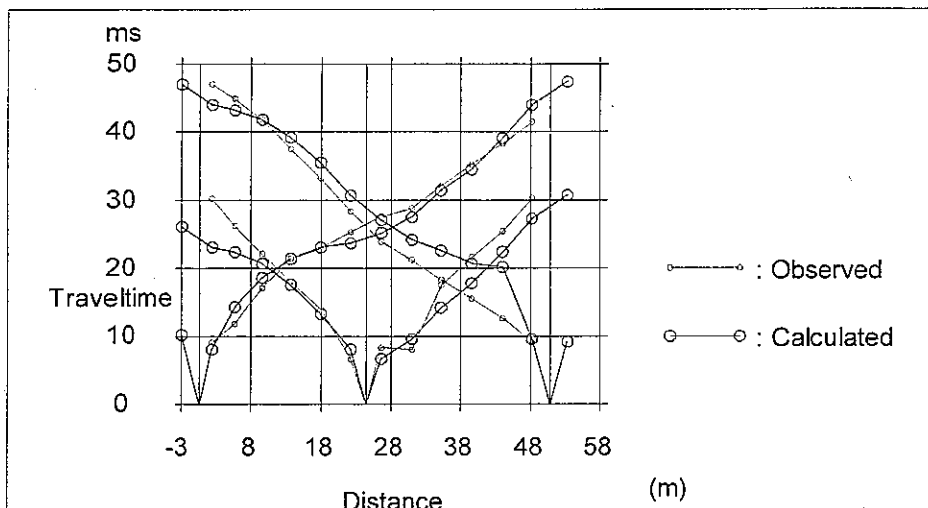


Tendido No.17

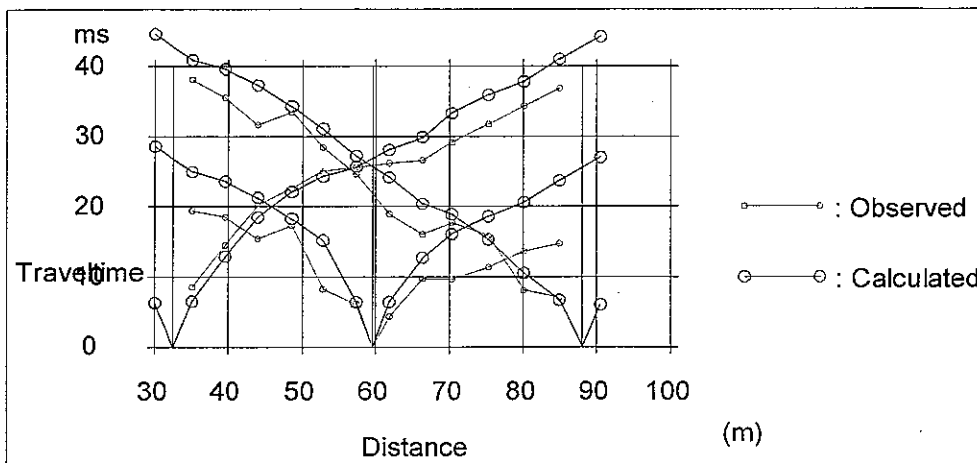


Tendido No.18

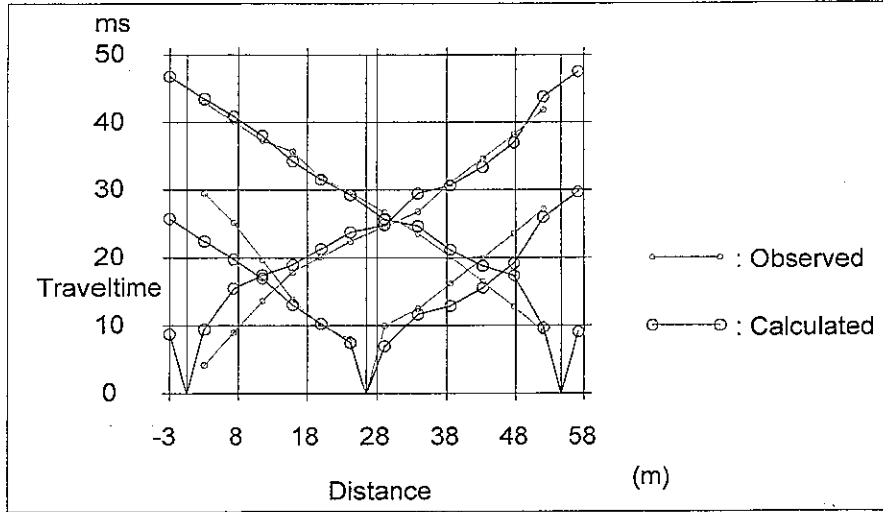




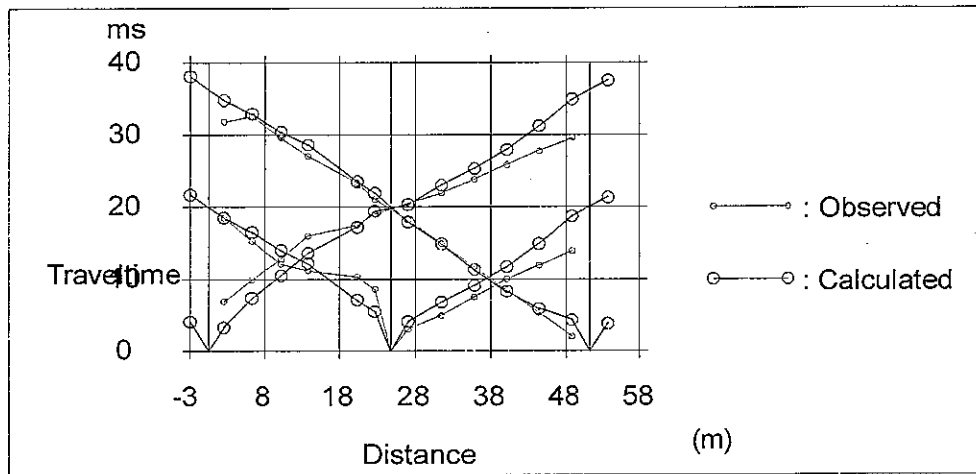
Tendido No.19



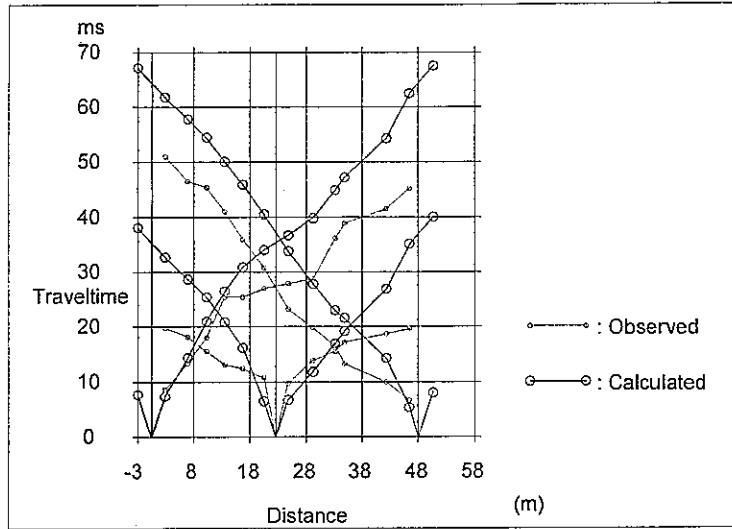
Tendido No.20



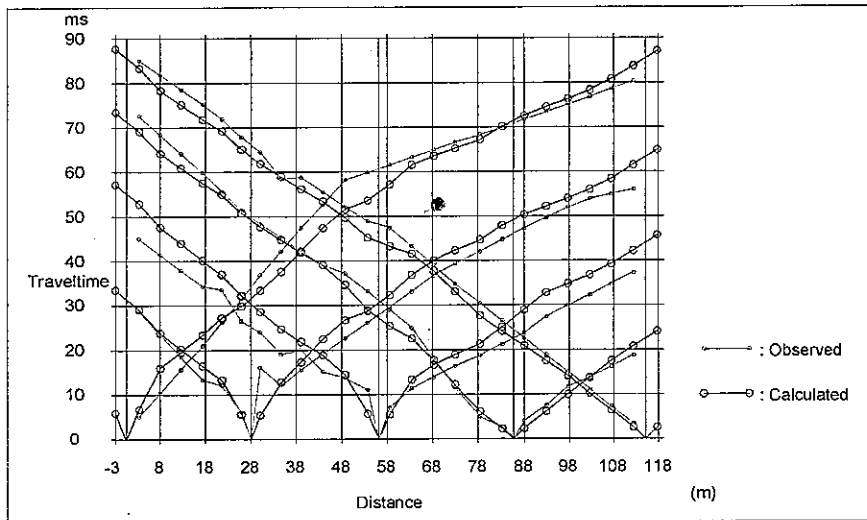
Tendido No.21



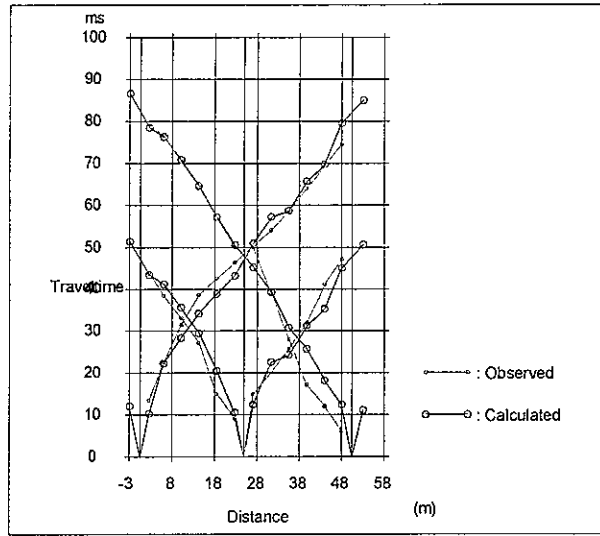
Tendido No.22



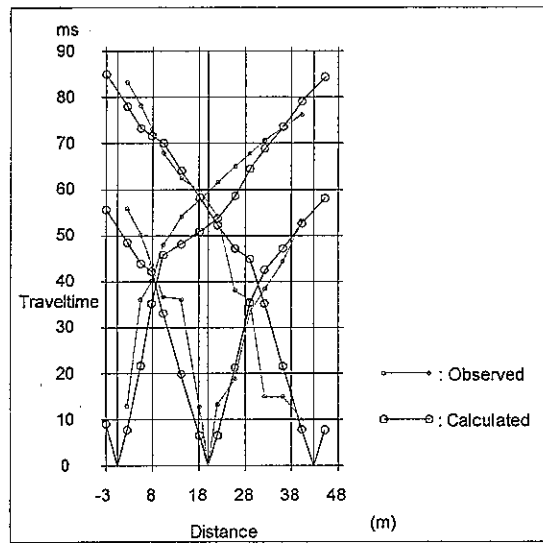
Tendido No.23



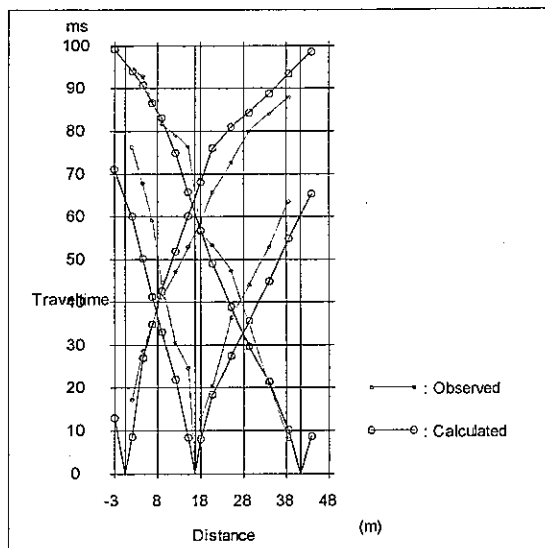
Tendido No.24



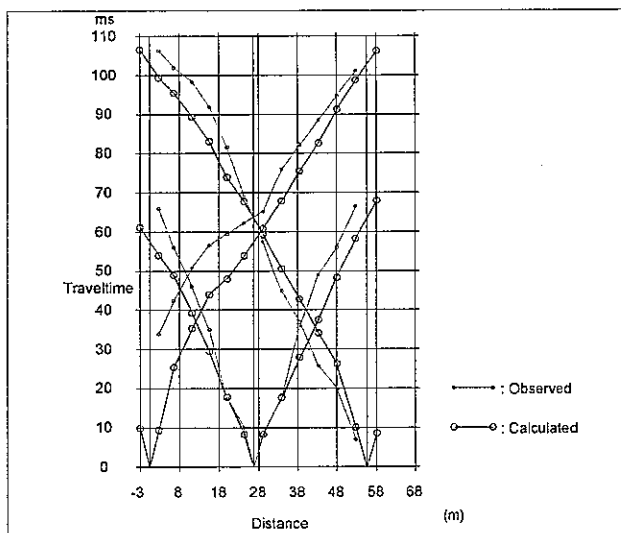
Tendido No.25



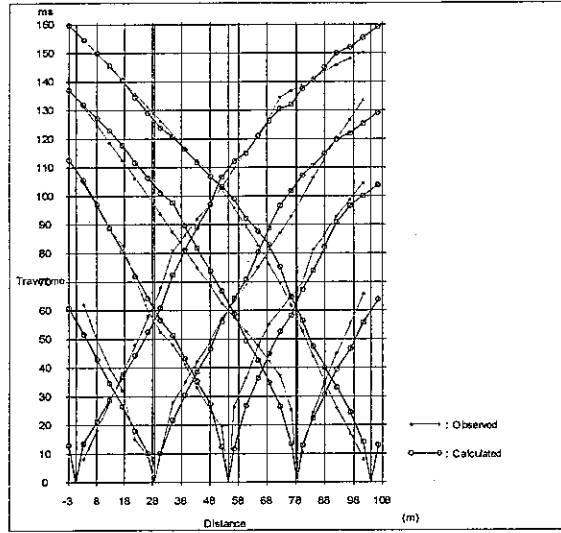
Tendido No.26



Tendido No.27



Tendido No.28



Tendido No.29



FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

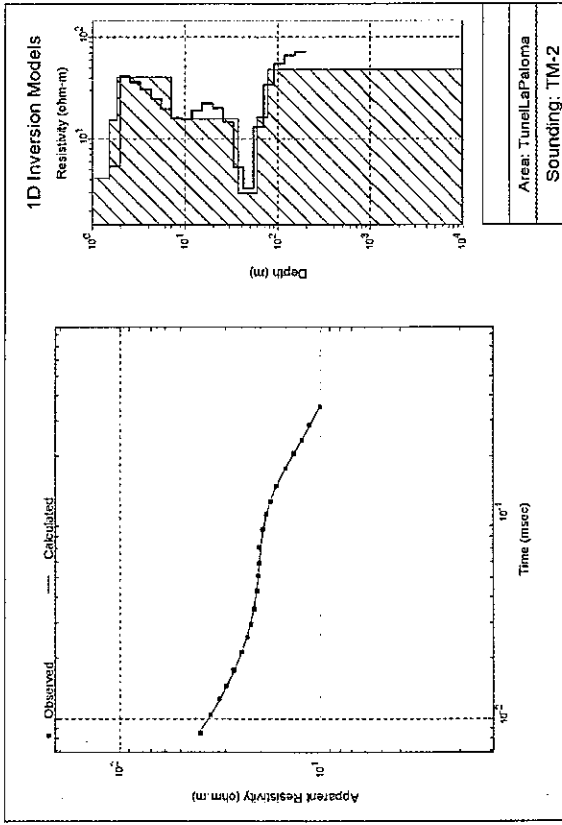
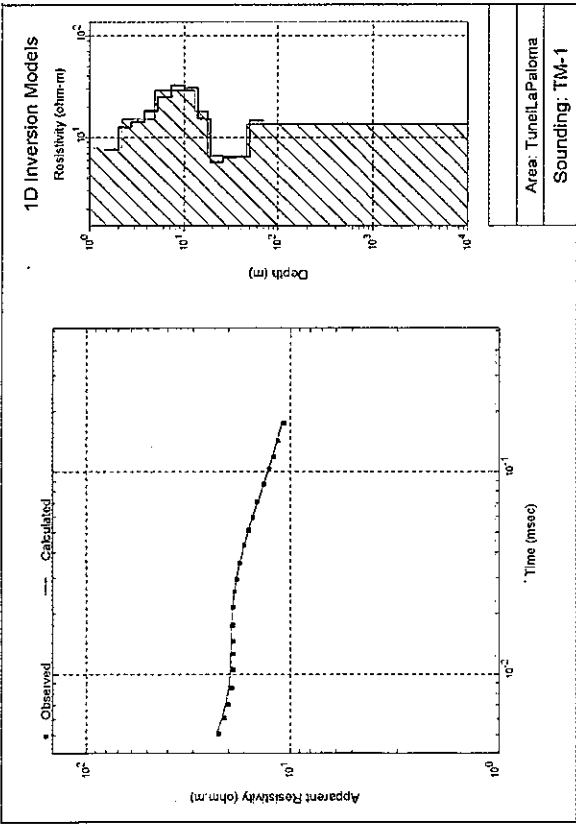
---

**ANEXO 4.3**  
**PROCESAMIENTO ELECTRICO**  
**(CURVAS DE RESITIVIDAD)**

Curvas de Resistividad y Fotos de los  
sitios de TEM:



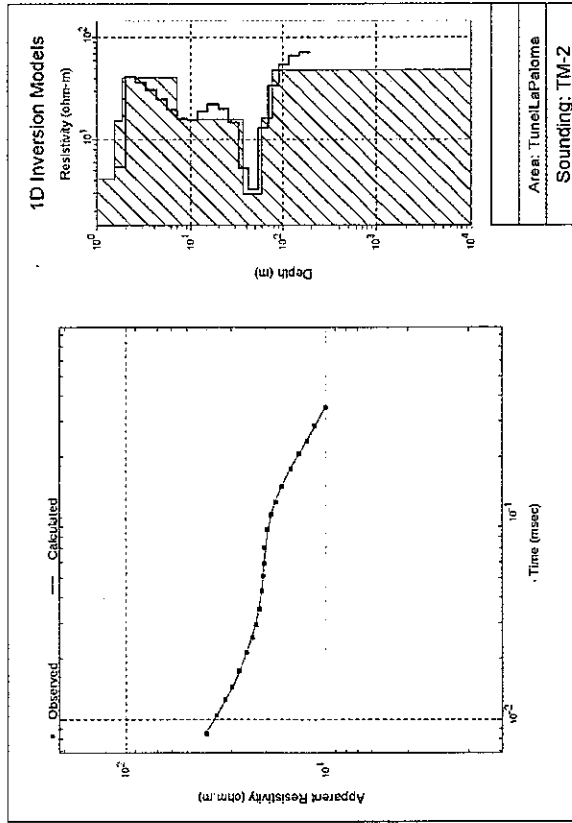
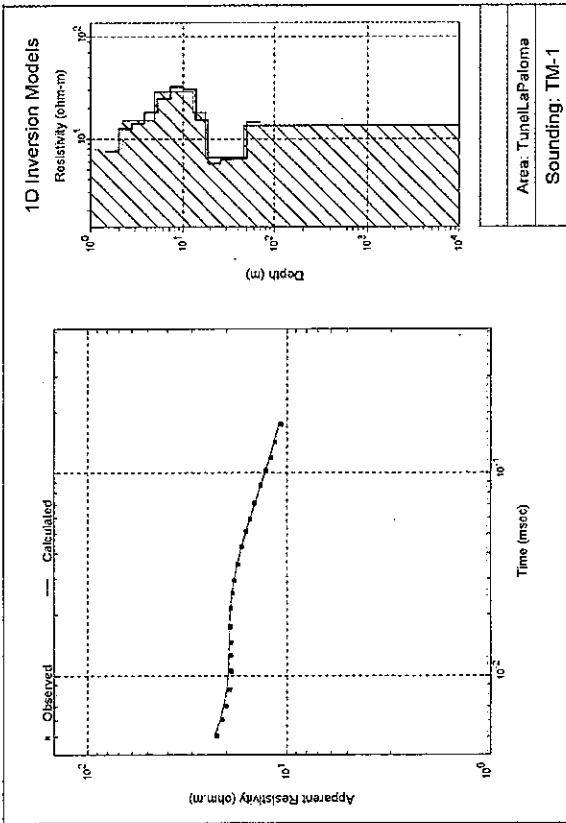
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM1 Y TEM2

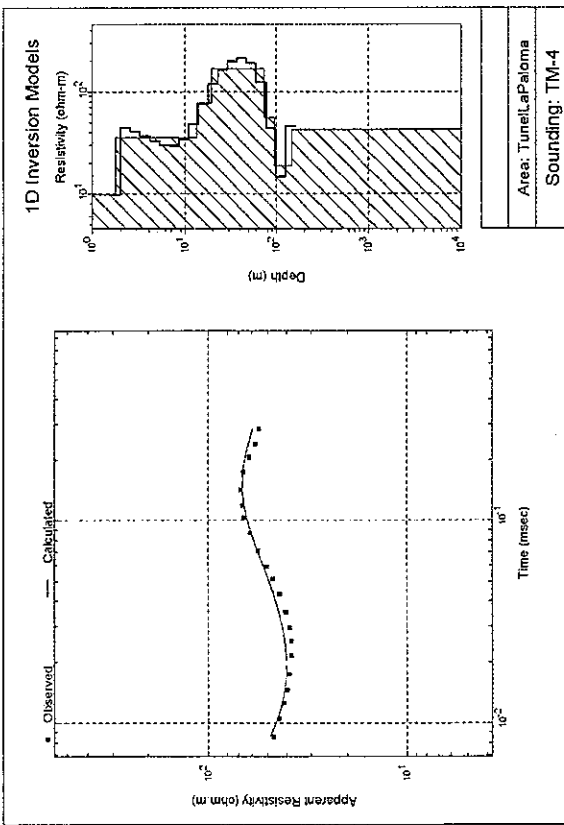
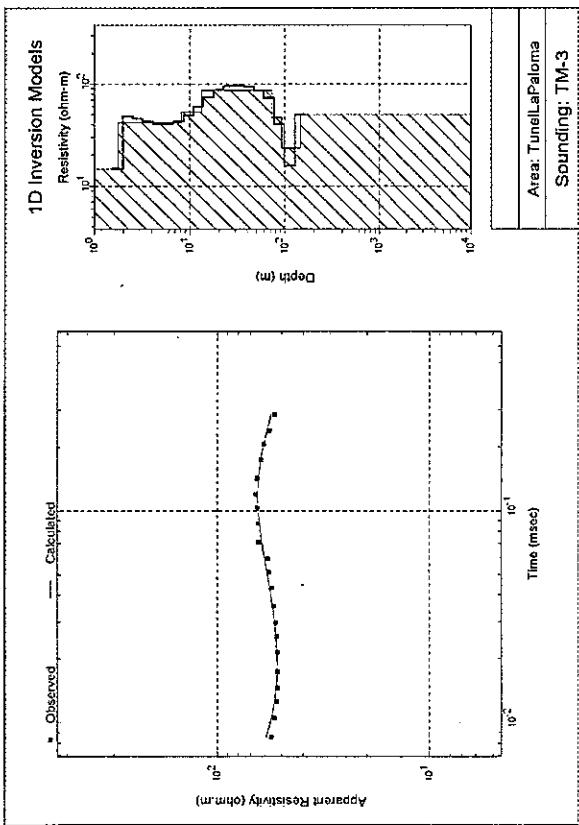
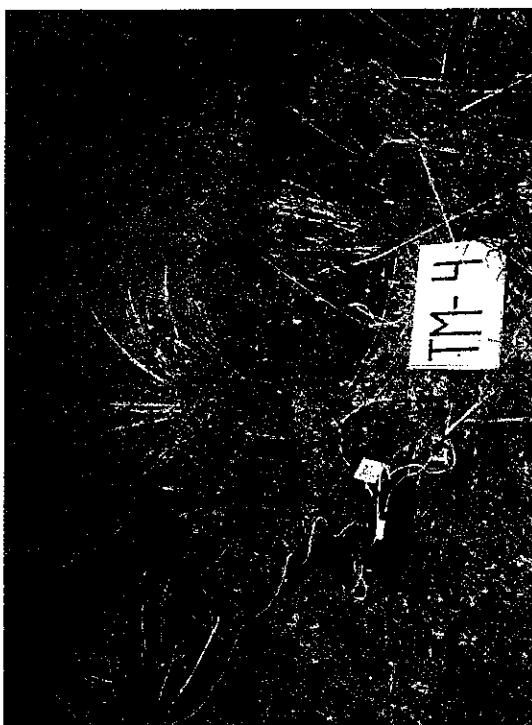




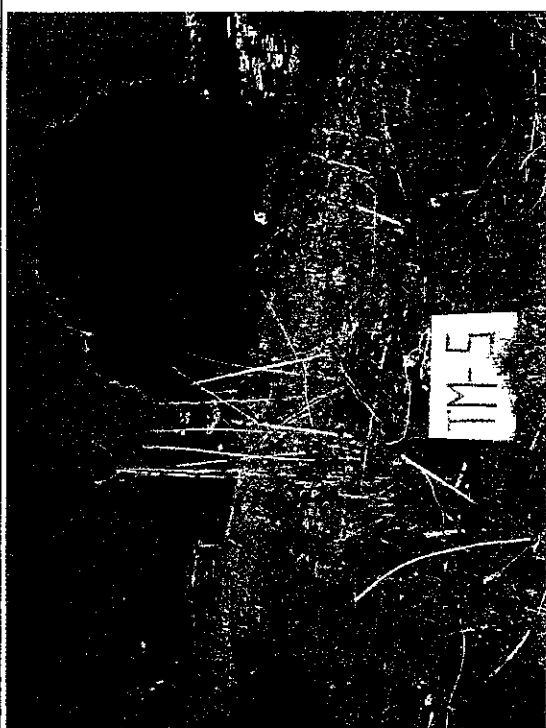


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM1 Y TEM2

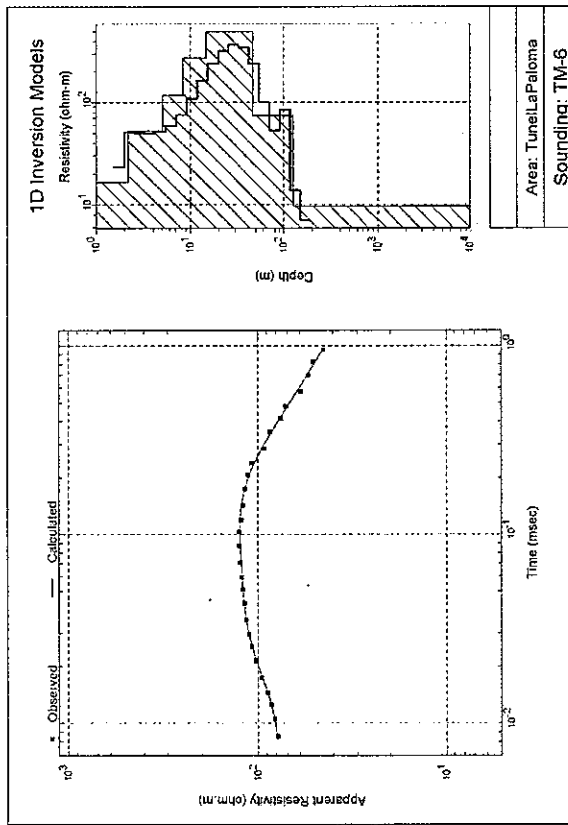
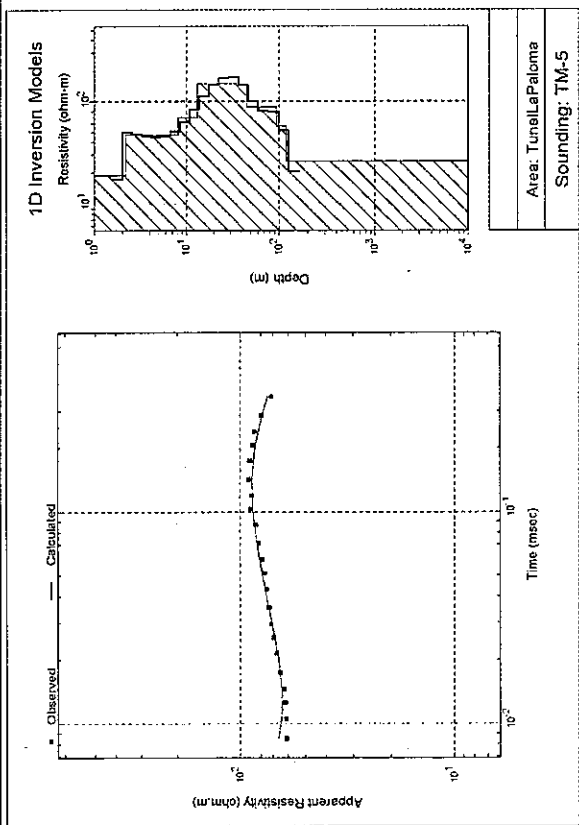




Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM3 Y TEM4

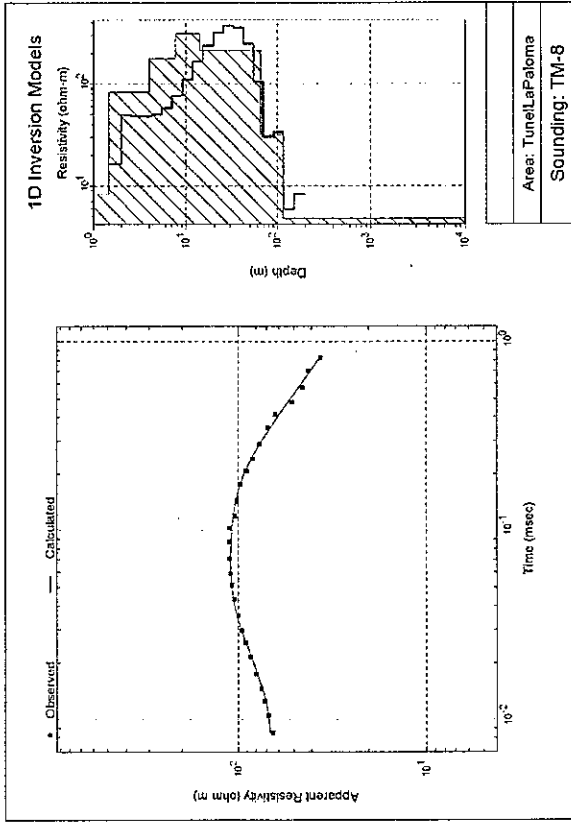
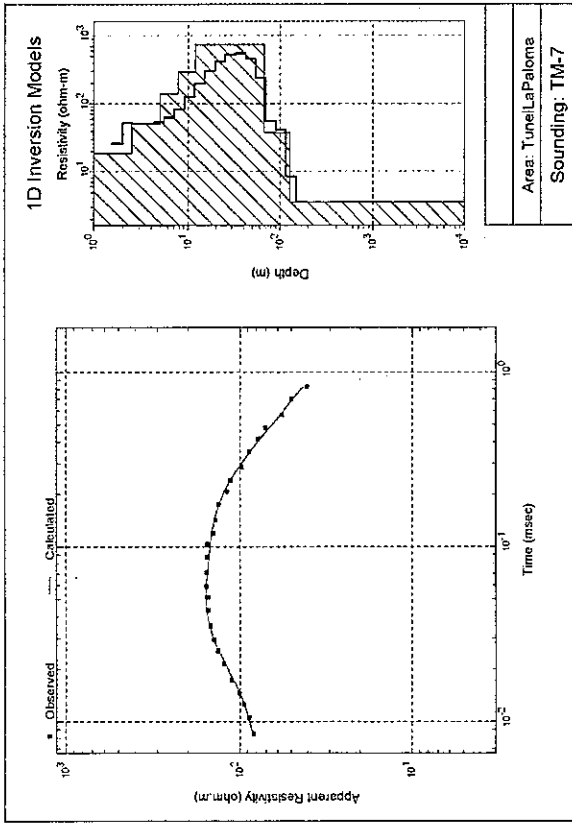


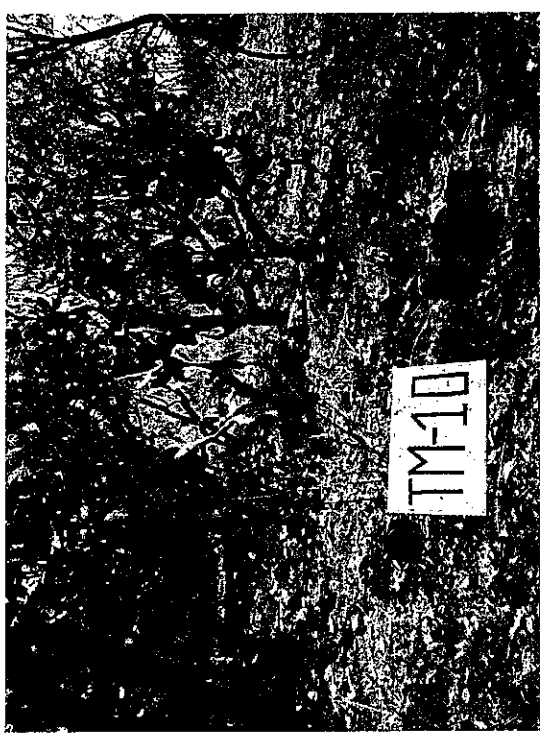
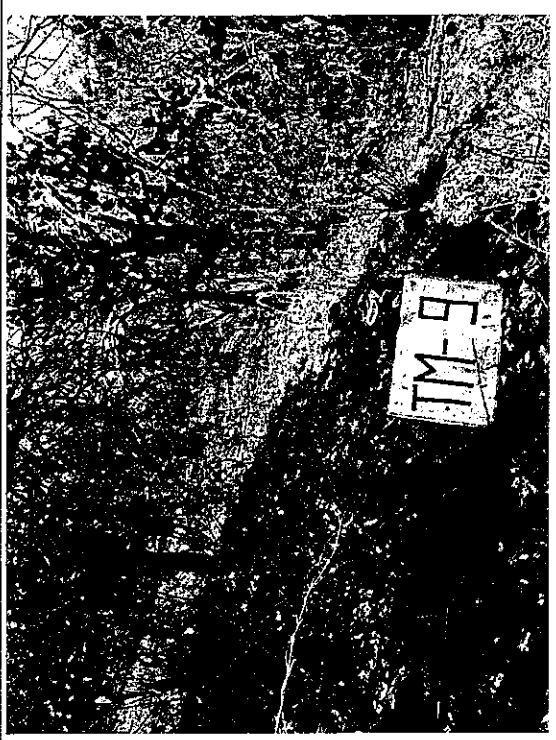
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM5 Y TEM6



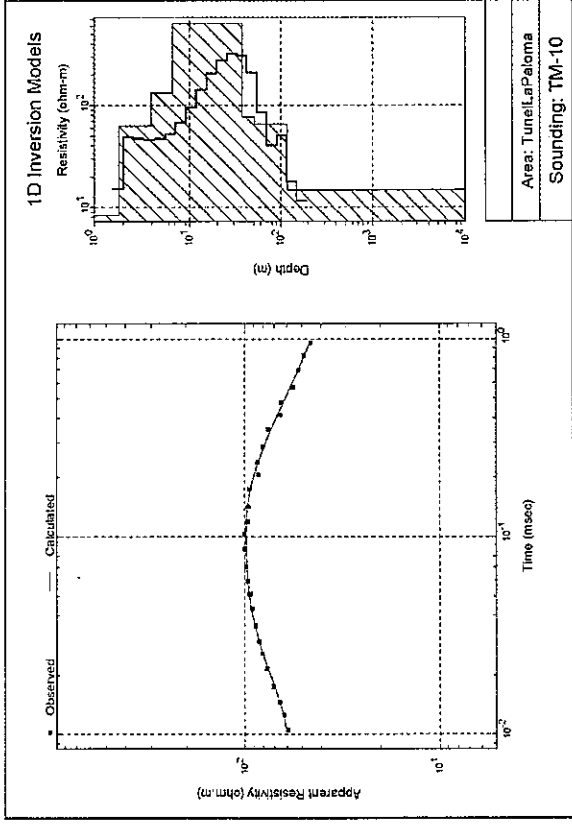
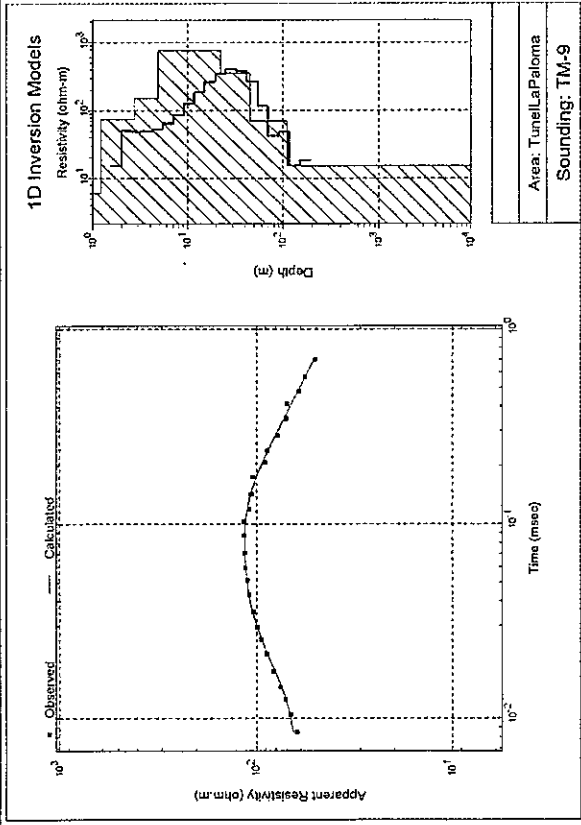


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM7 Y TEM8



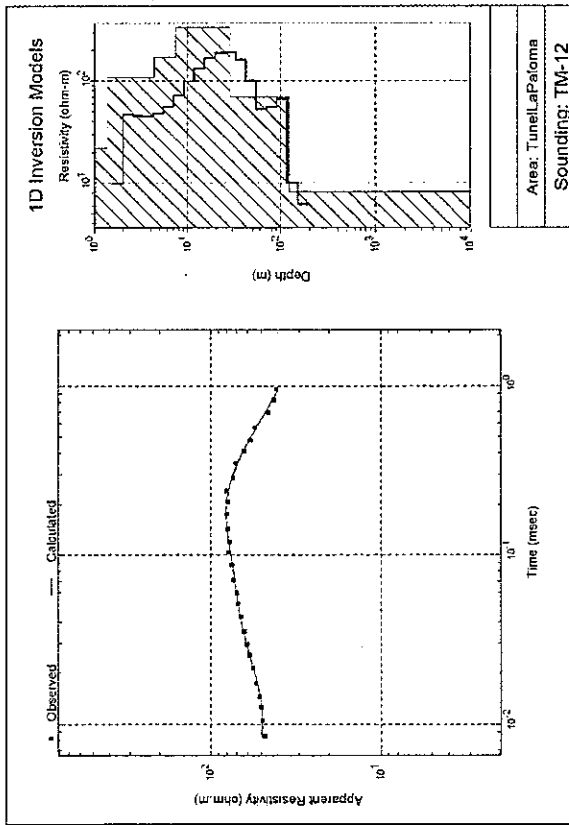
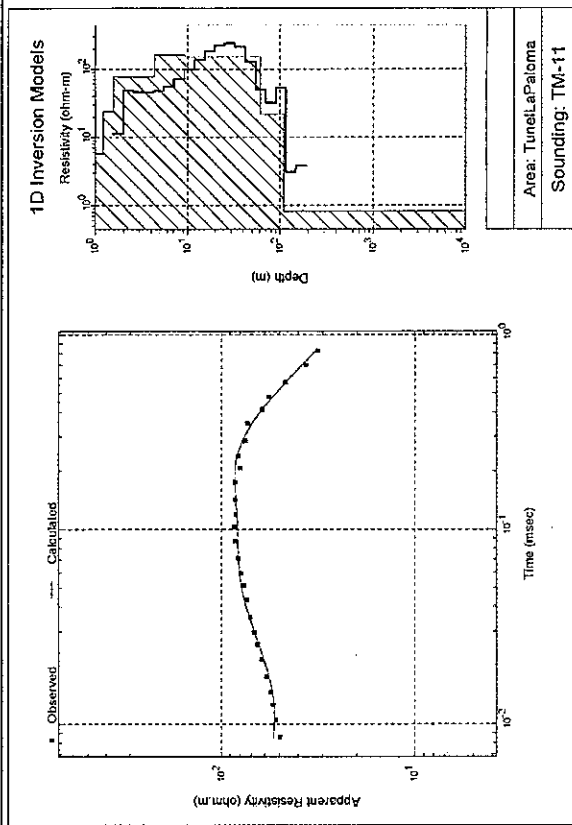


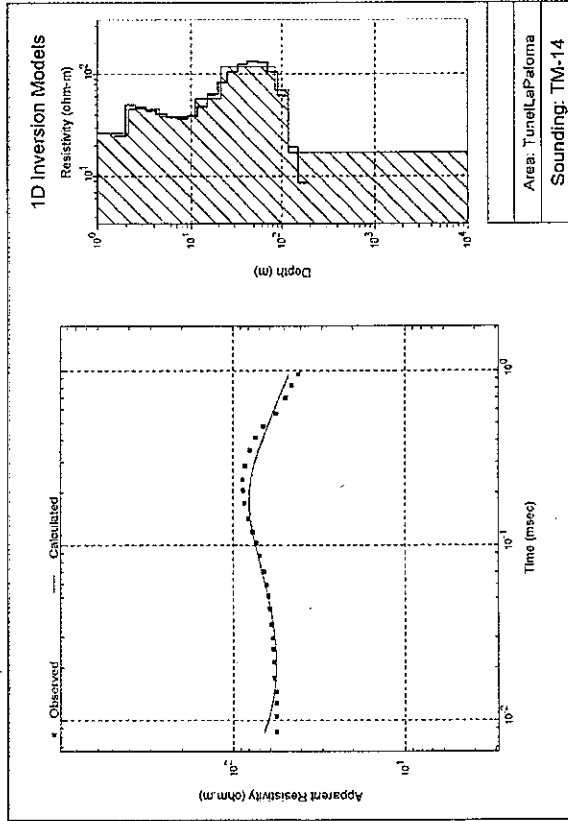
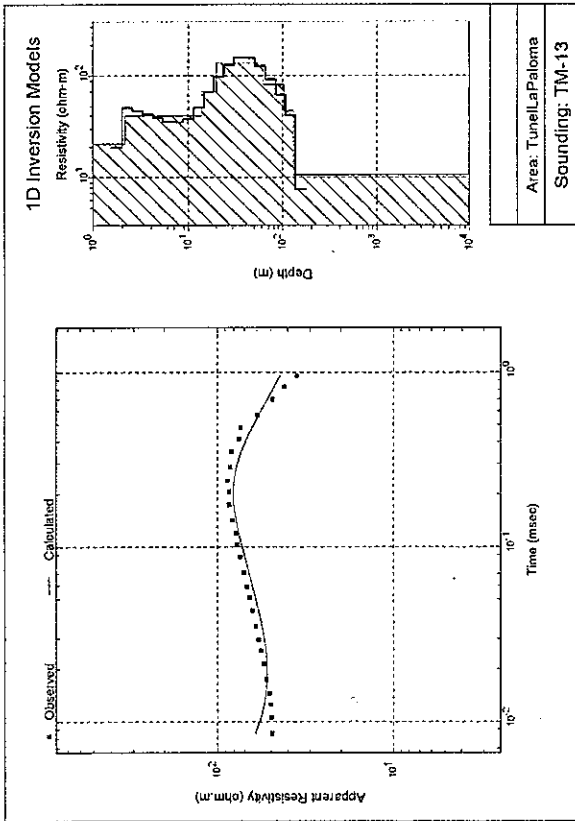
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM9 Y TEM10



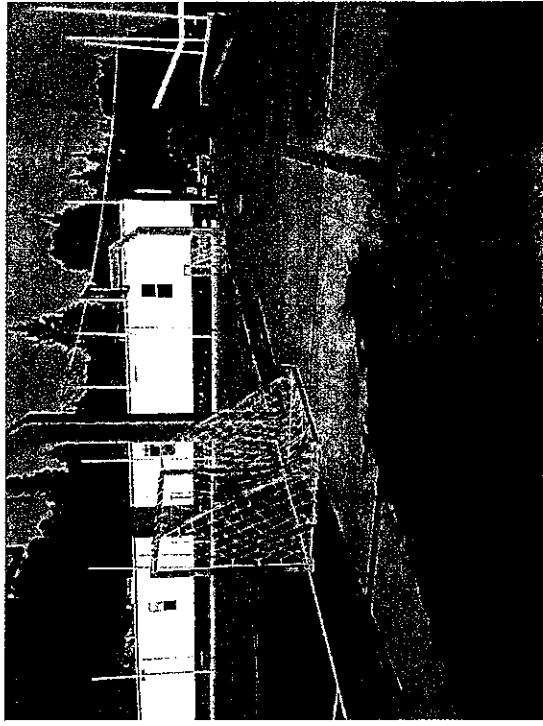


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM11 Y TEM12

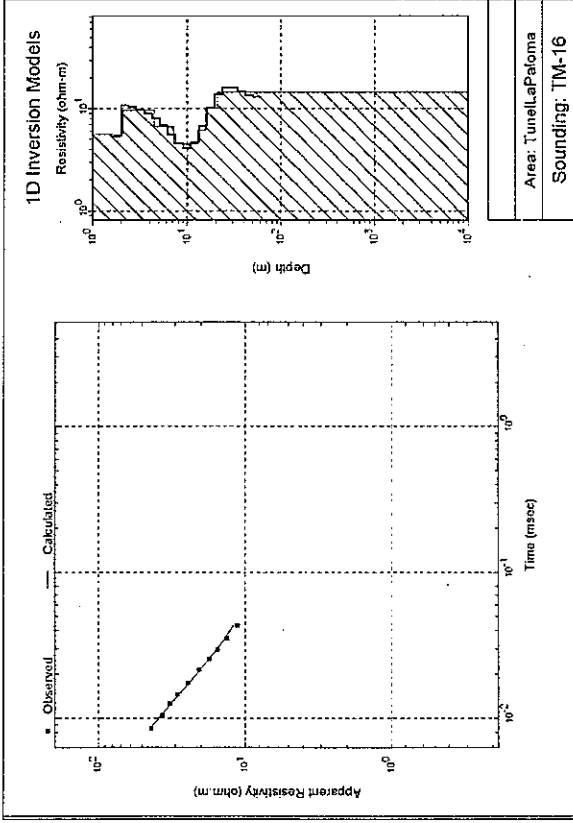
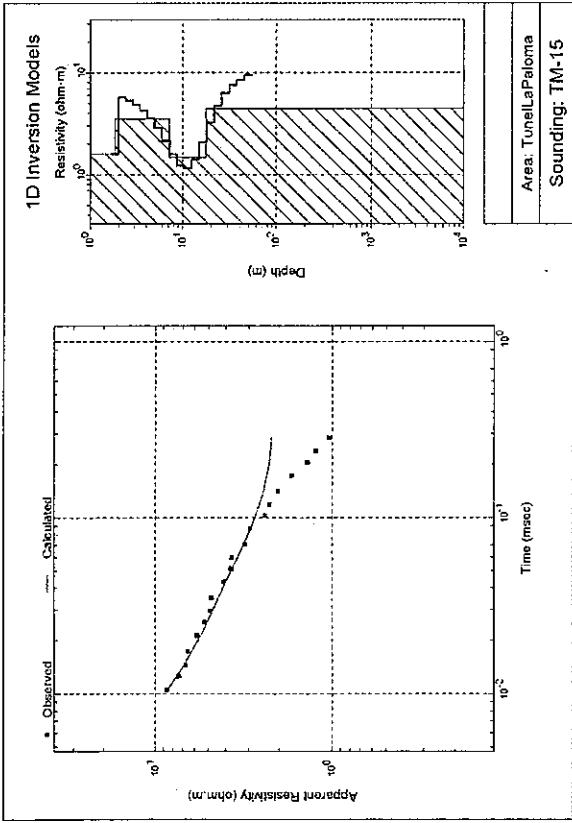




Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM13 Y TEM14



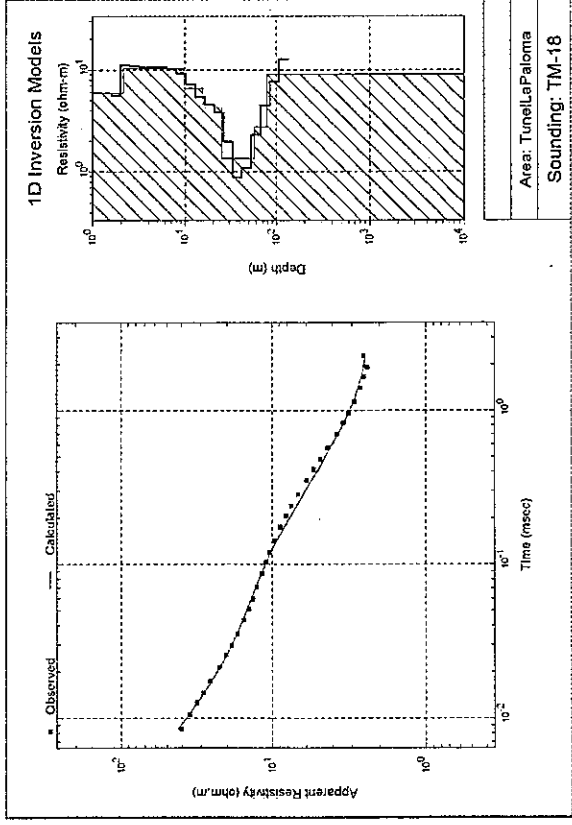
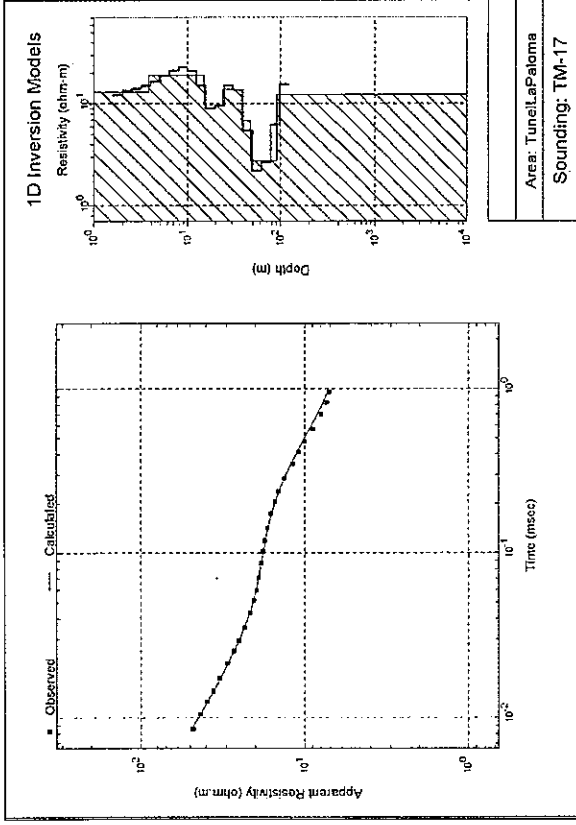
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM15 Y TEM16

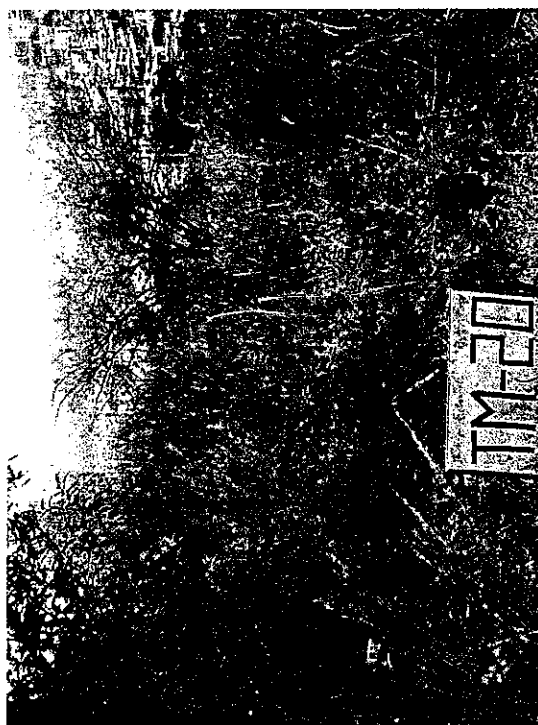




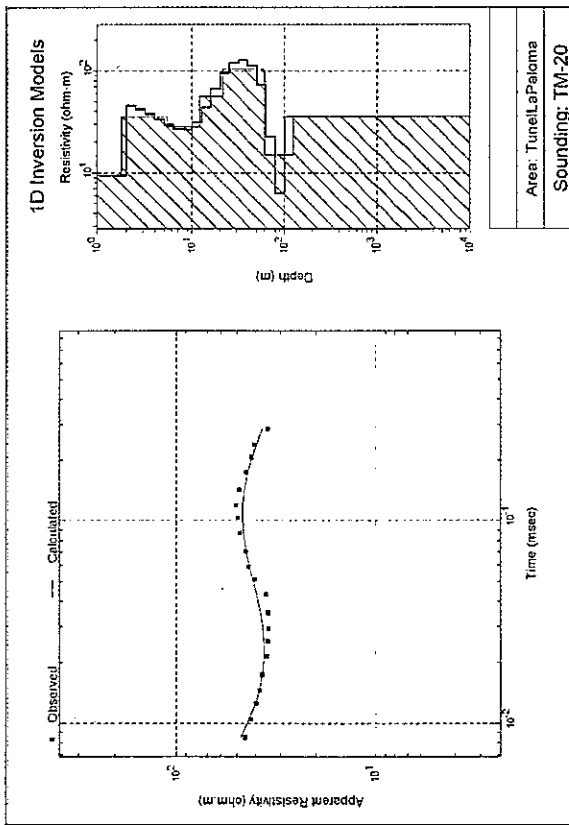
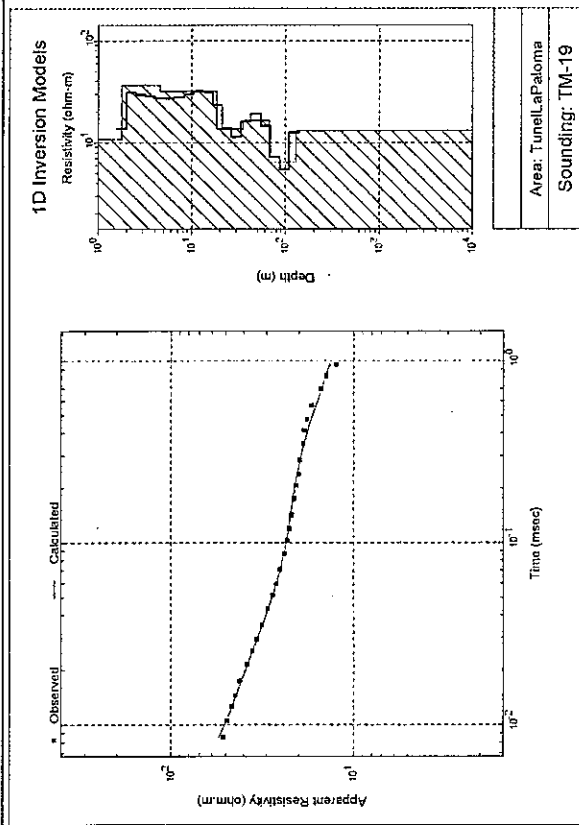


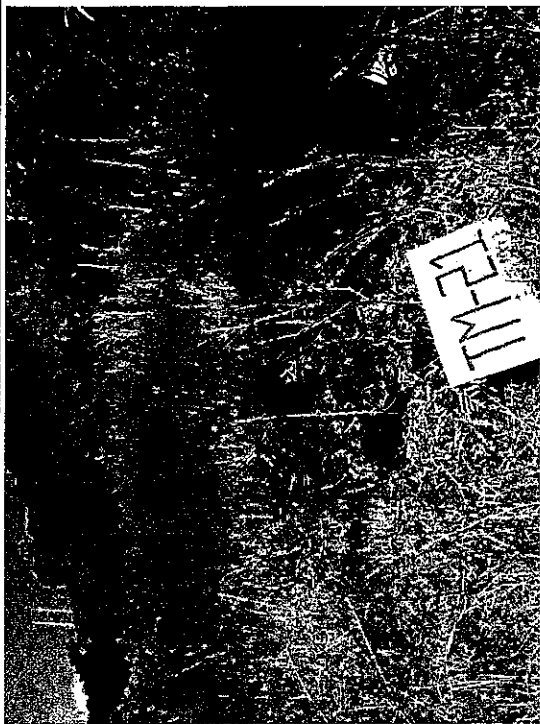
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM17 Y TEM18



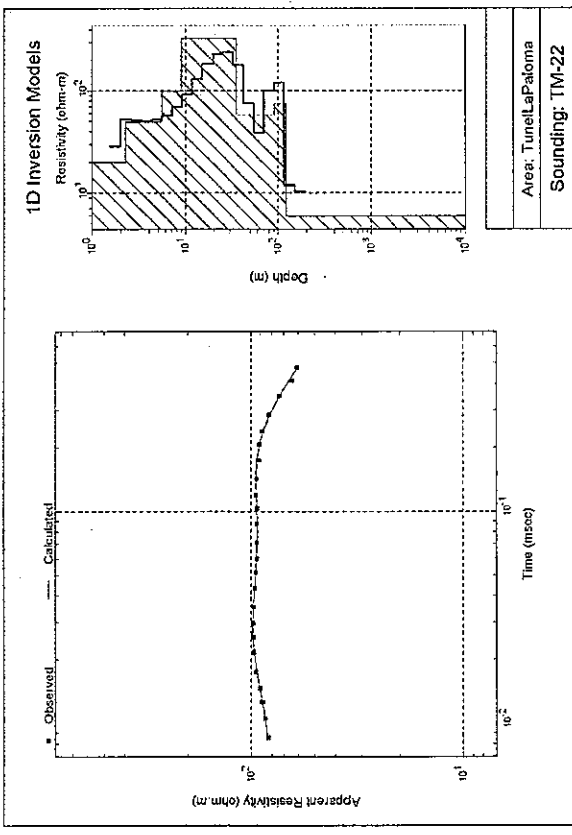
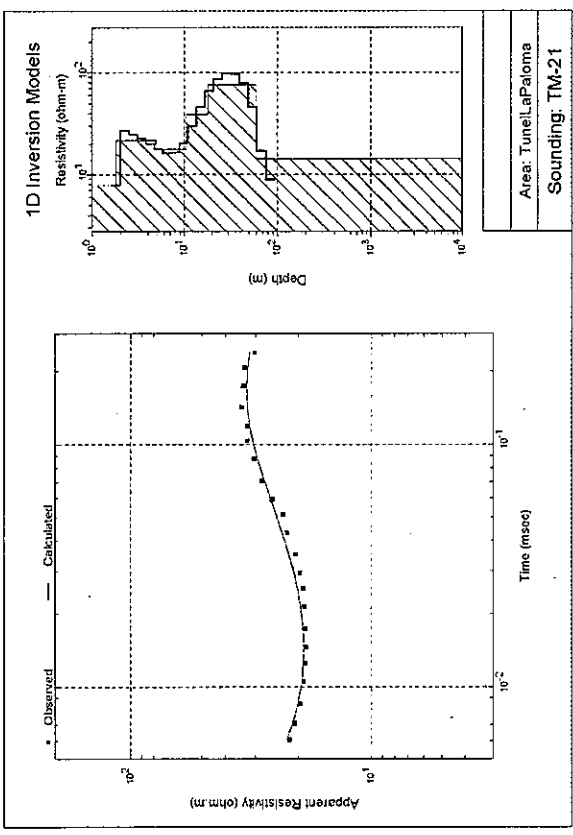


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM19 Y TEM20



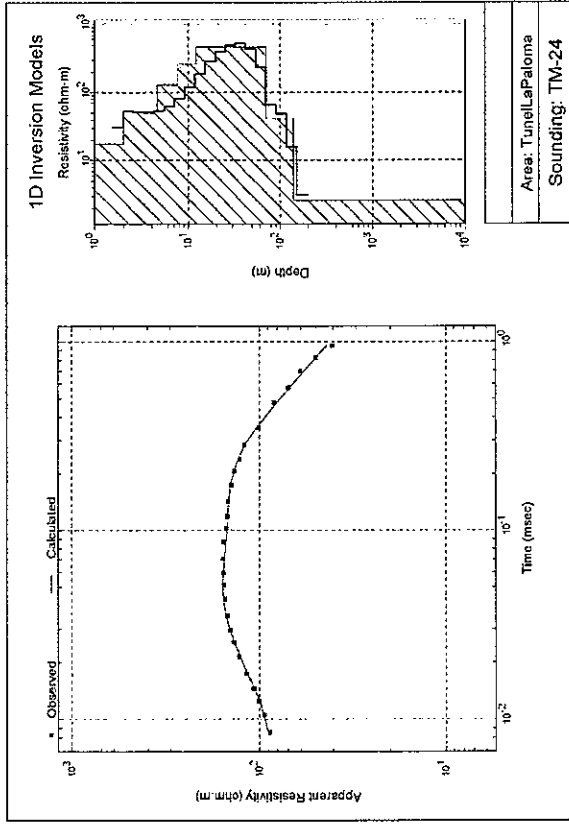
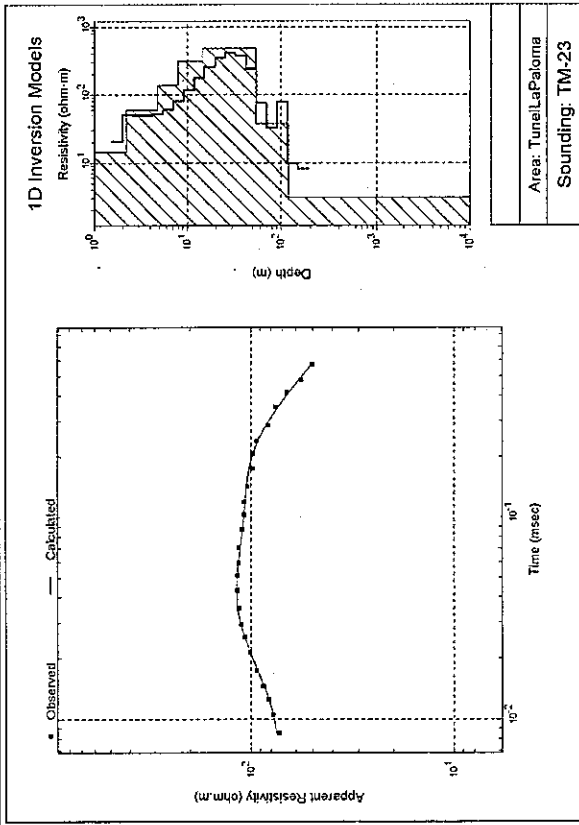


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM21 Y TEM22



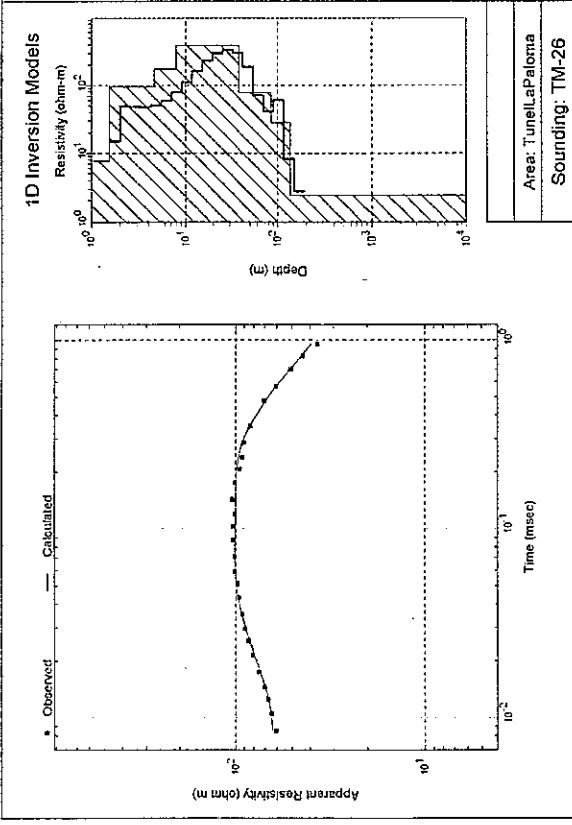
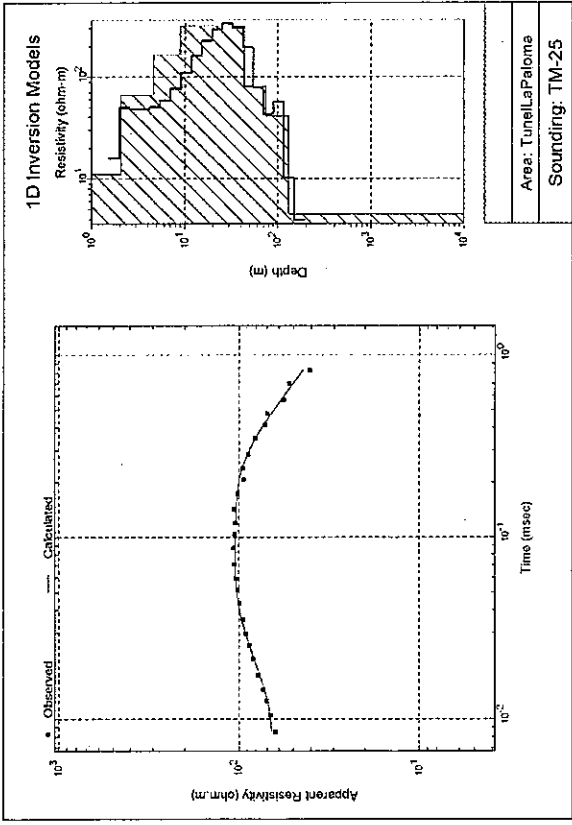


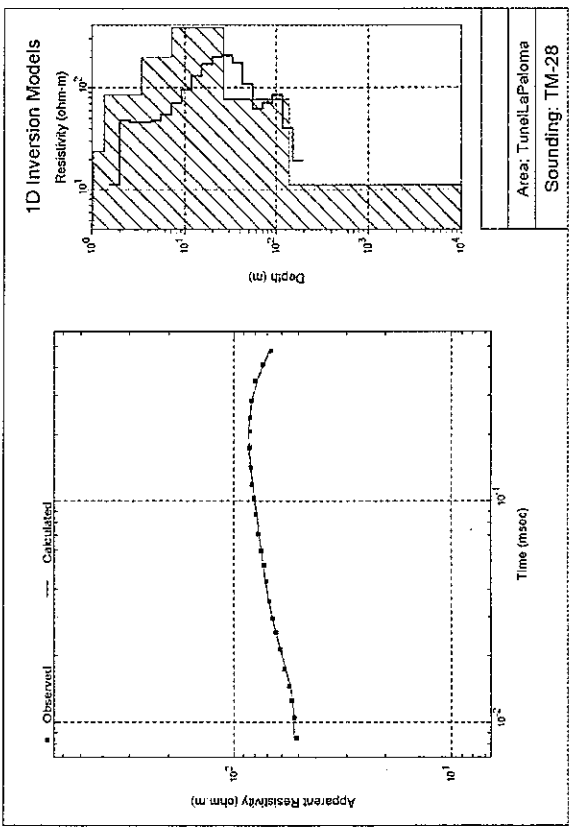
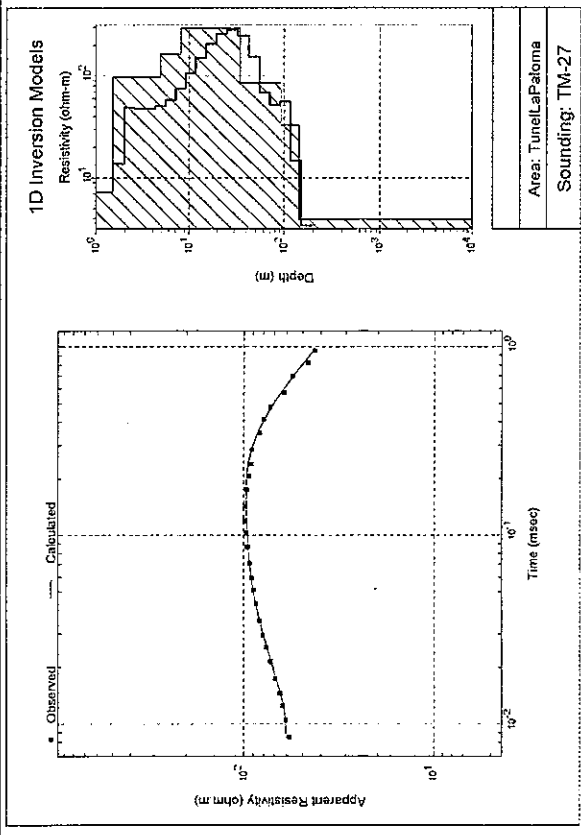
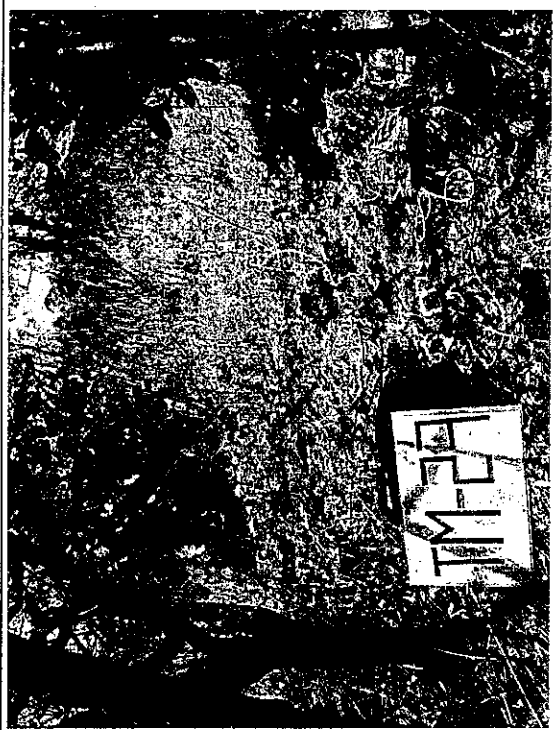
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM23 Y TEM24



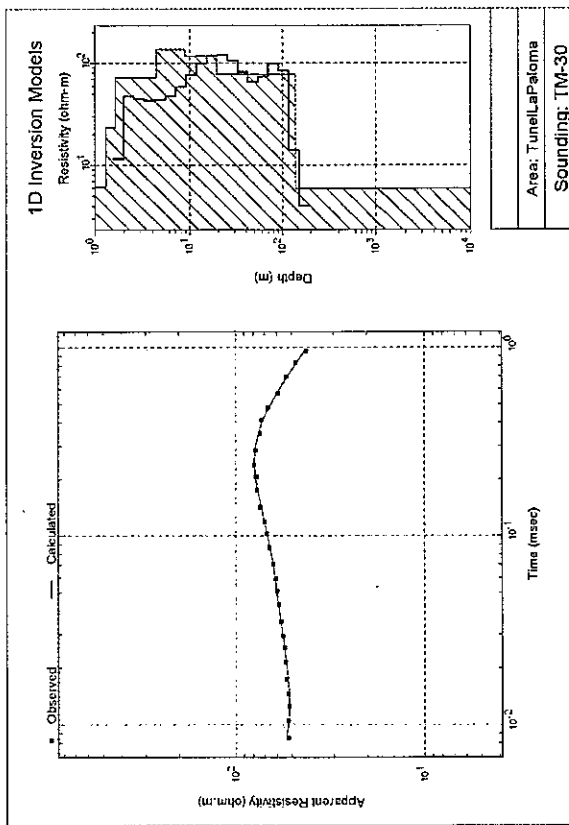
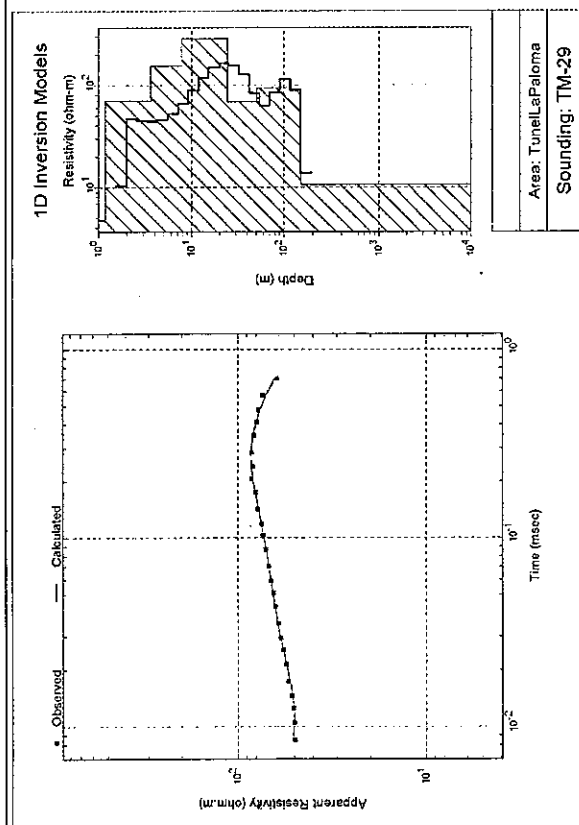


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM25 Y TEM26

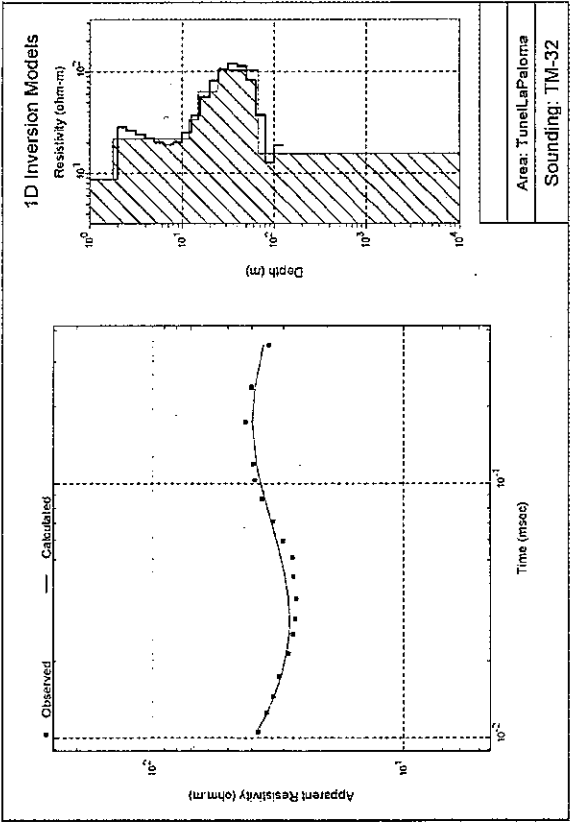
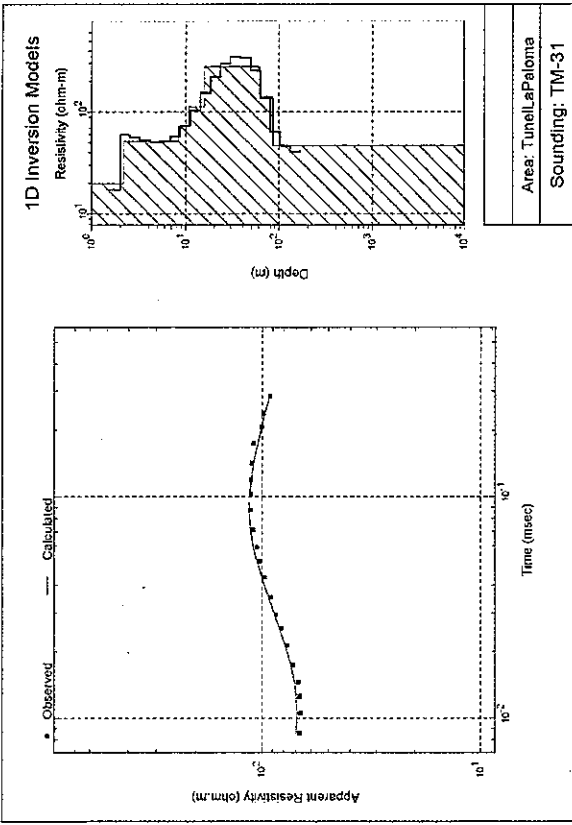
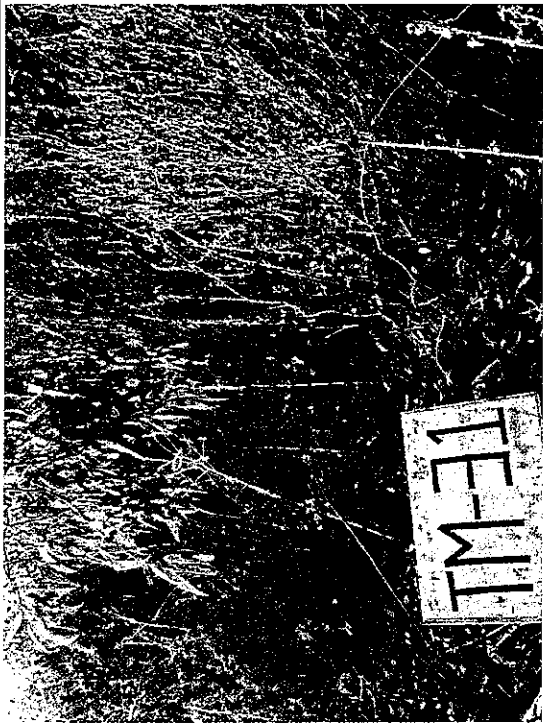




Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM27 Y TEM28



Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM29 Y TEM30

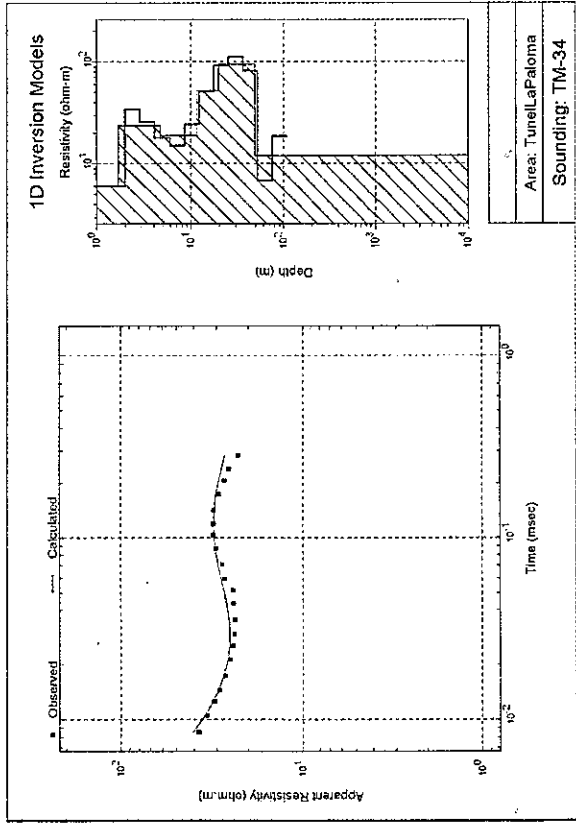
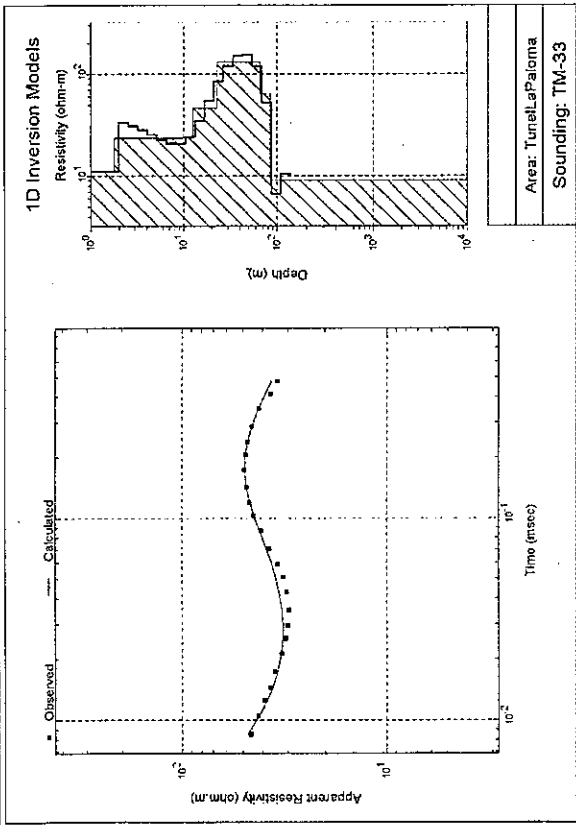


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM31 Y TEM32



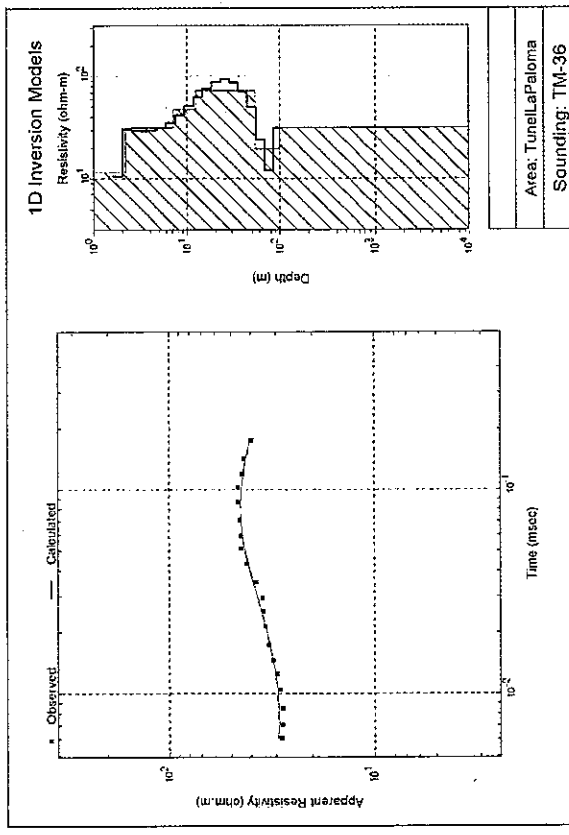
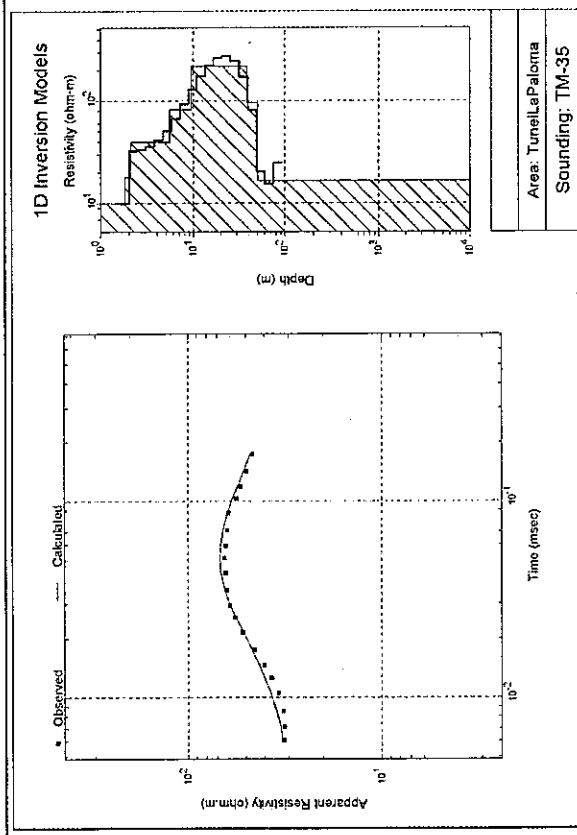


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM33 Y TEM34



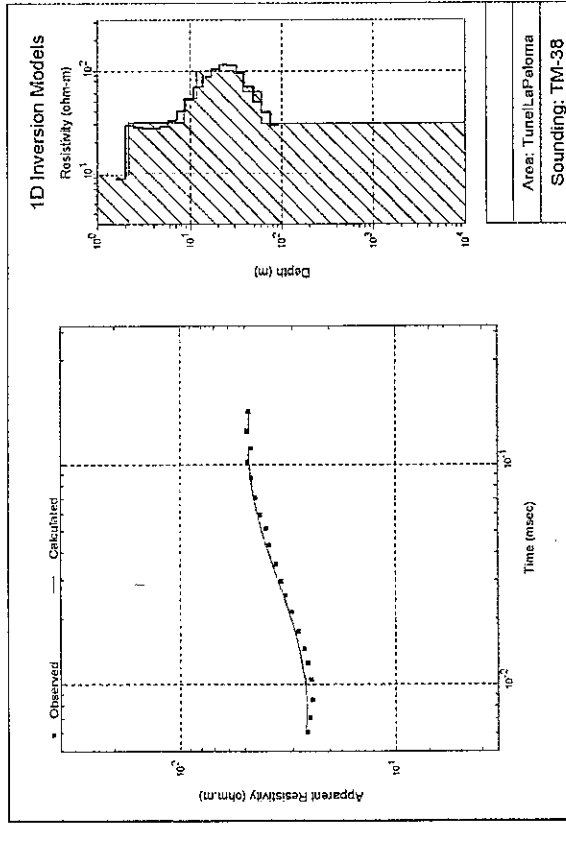
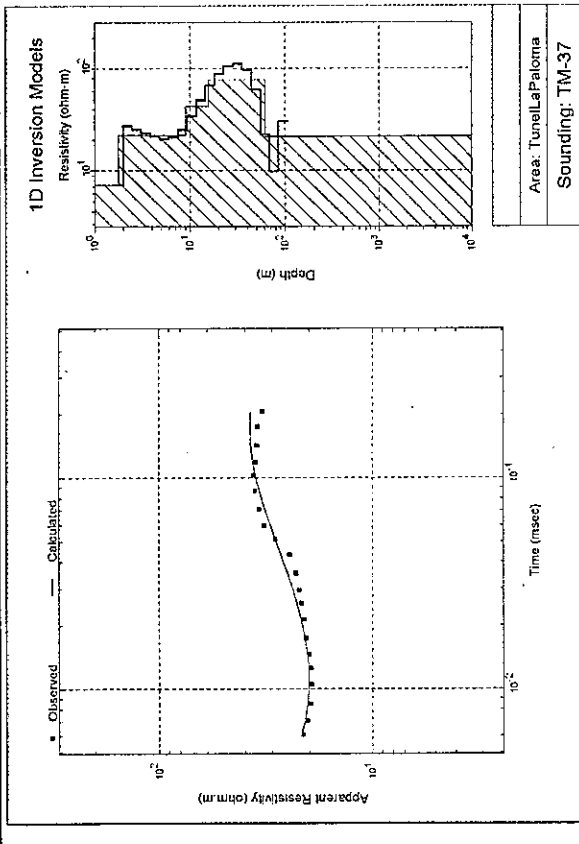


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM35 Y TEM36



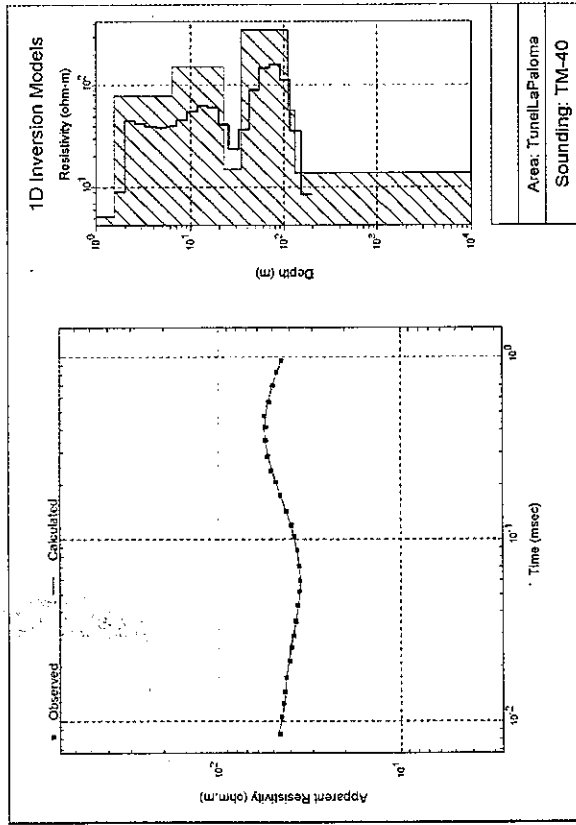
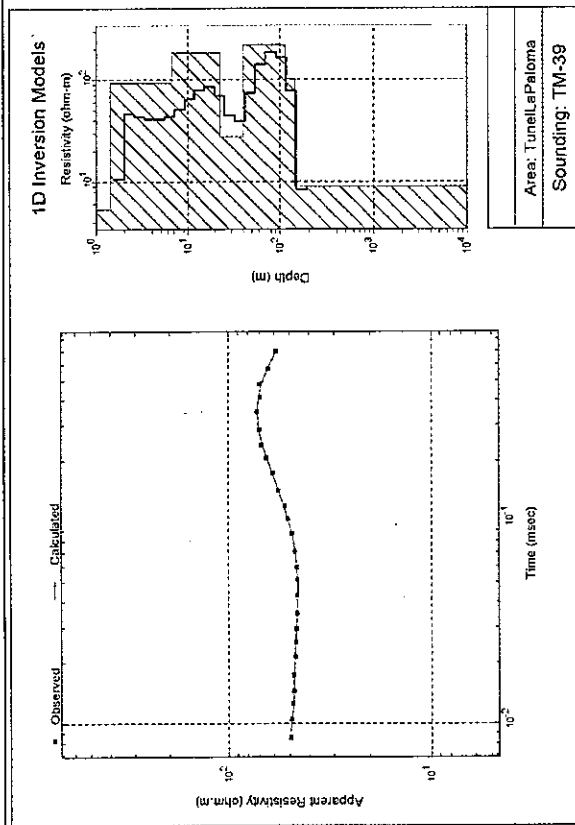


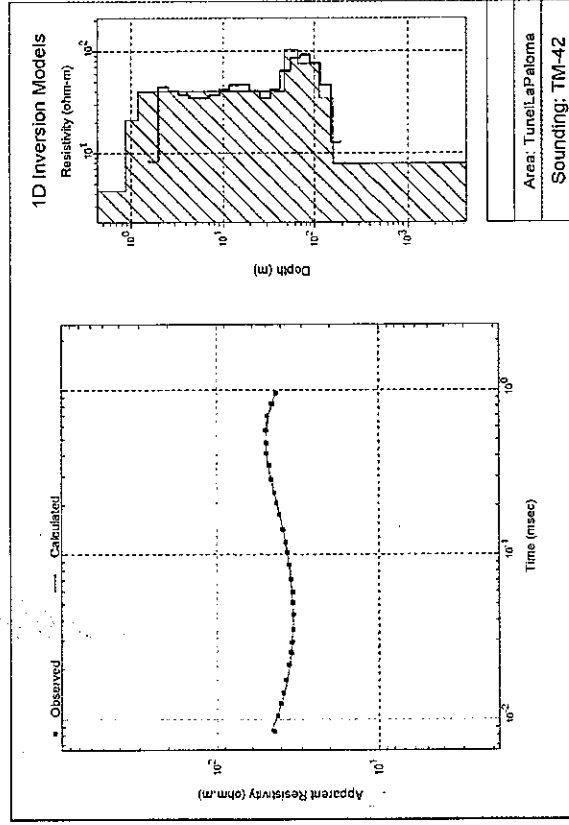
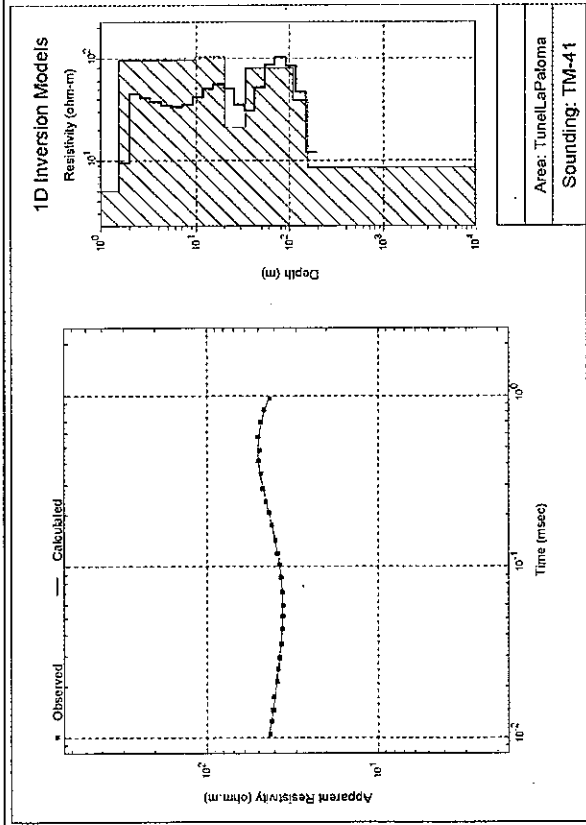
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM37 Y TEM38





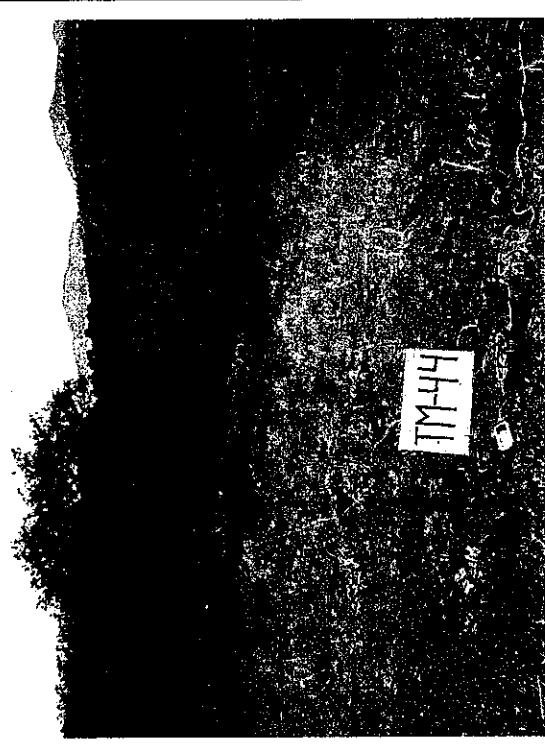
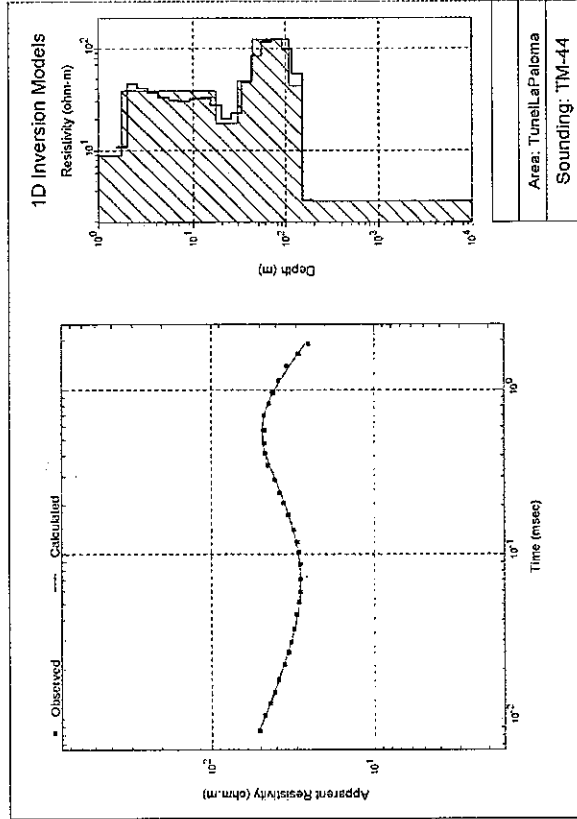
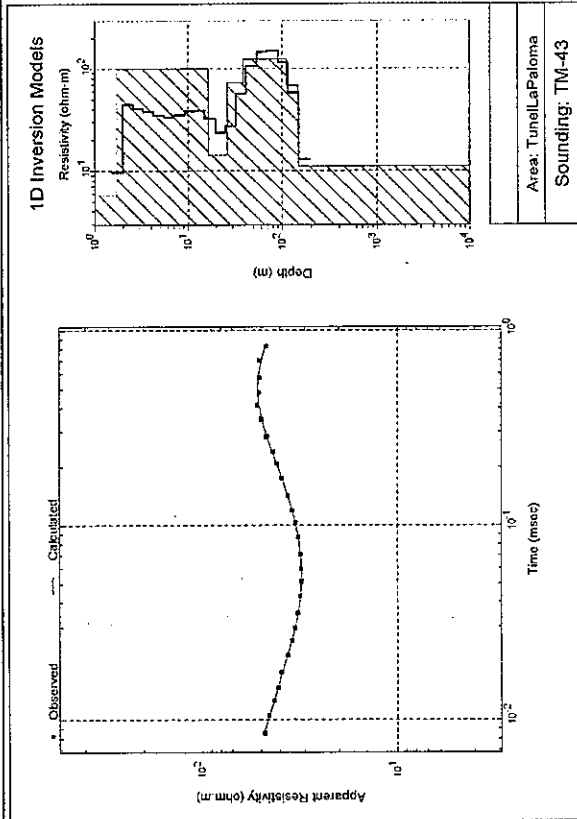
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM39 Y TEM40





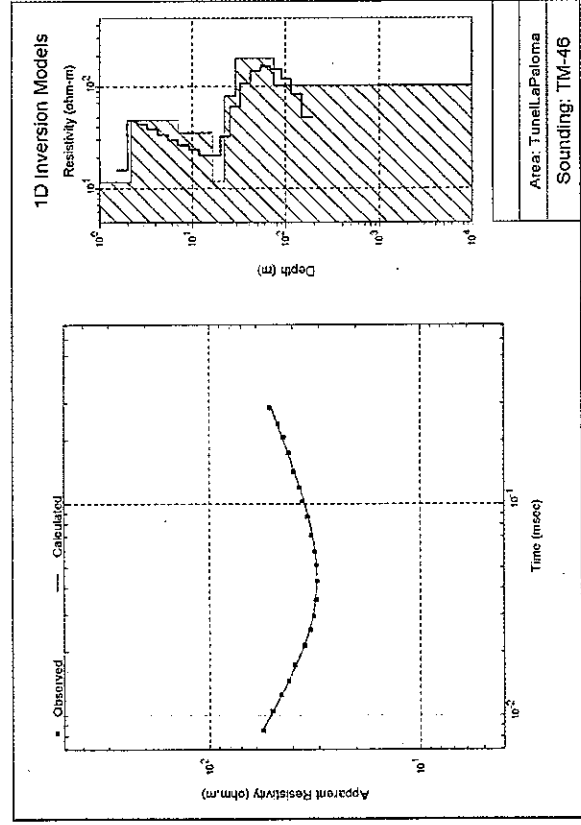
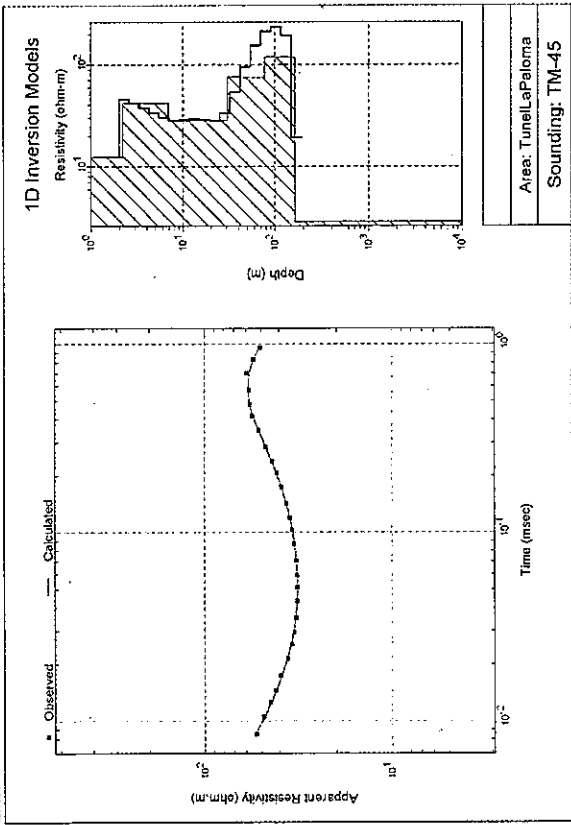
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM41 Y TEM42

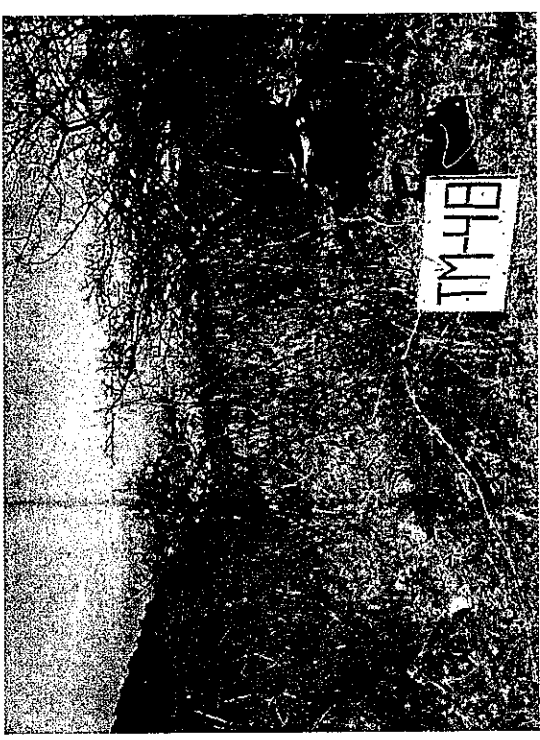
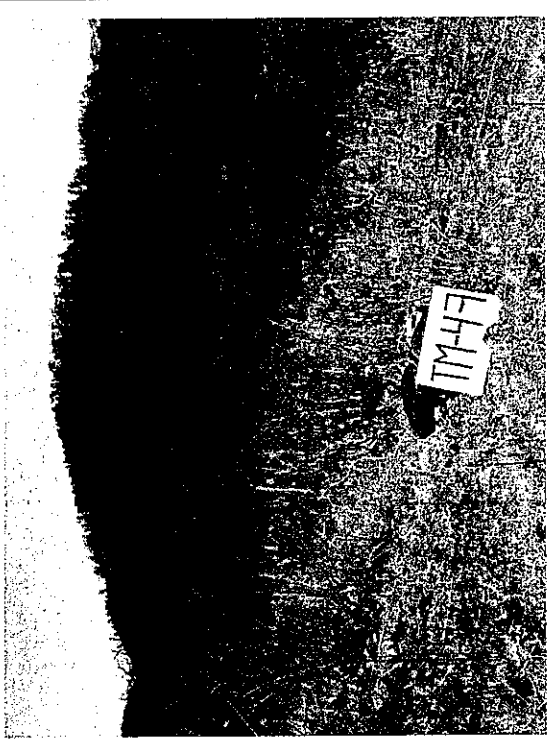
Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM43 Y TEM44



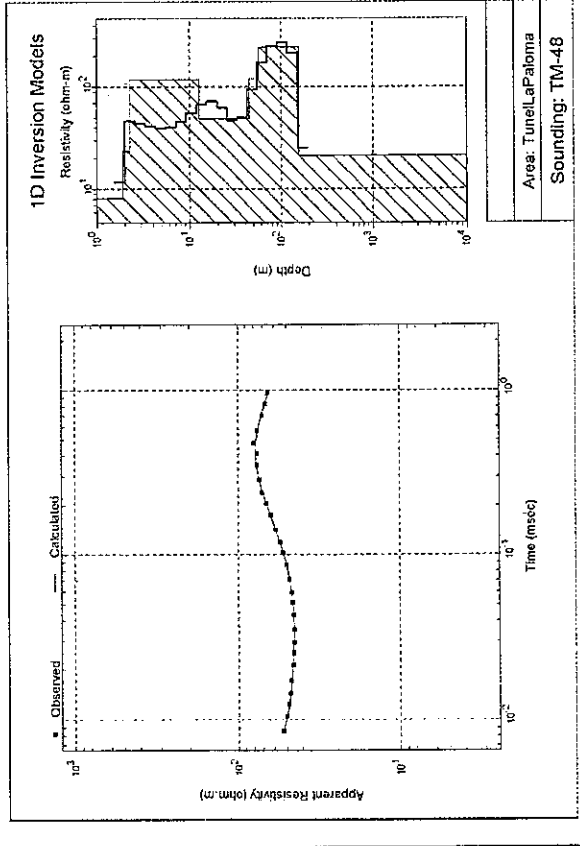
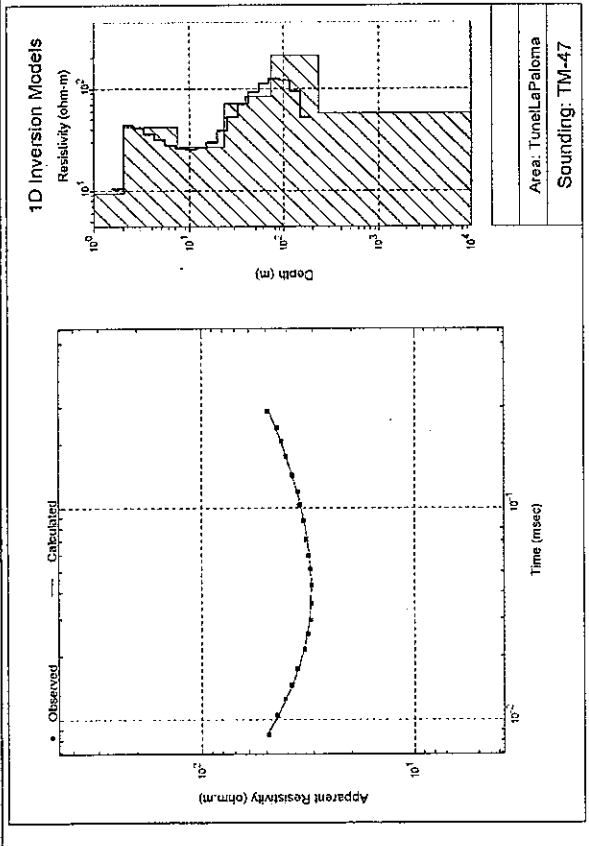


Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM45 Y TEM46

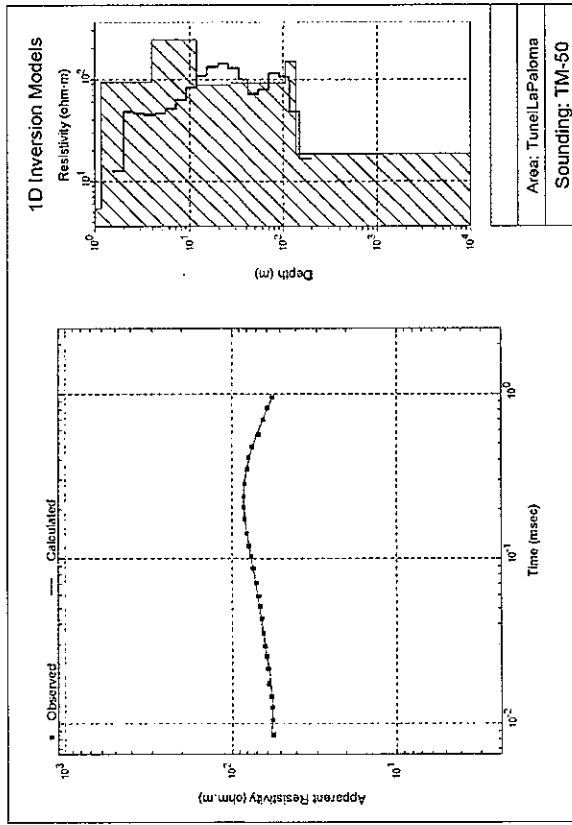
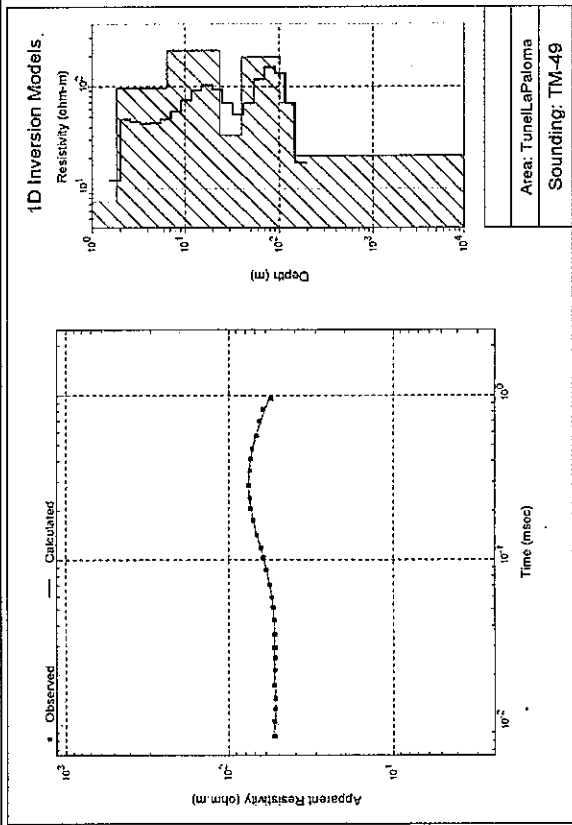




Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM47 Y TEM48







Curvas de Resistividad y Fotos de los sitios de TEM: TEM49 Y TEM50

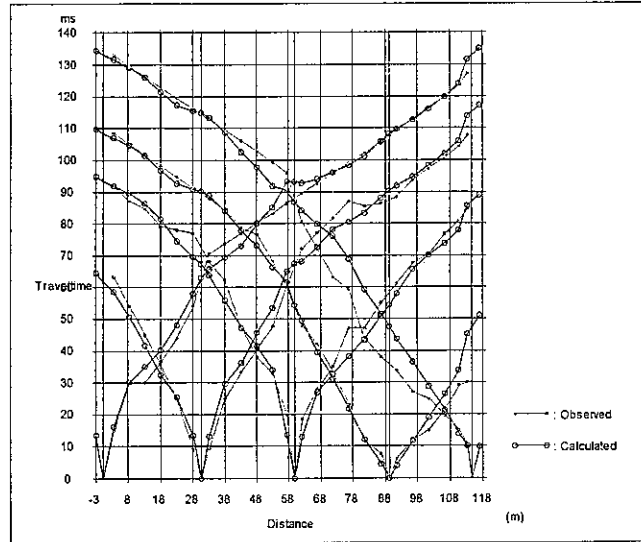




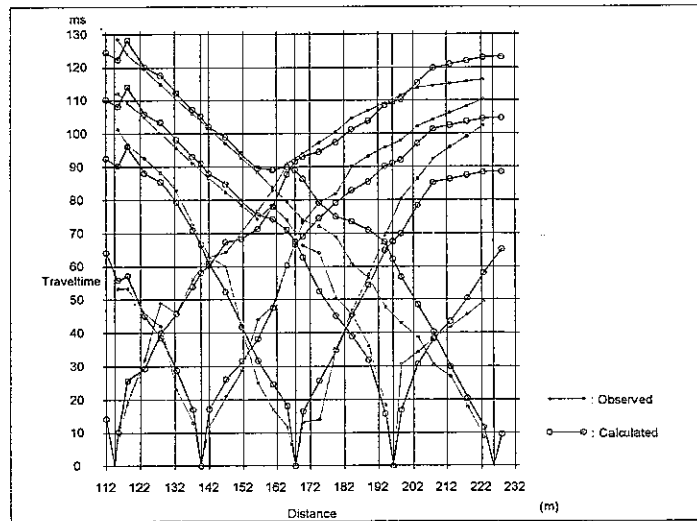
**ANEXO 4.2**  
**PROCESAMIENTO SISMICO**  
**(DROMOCRONICAS)**



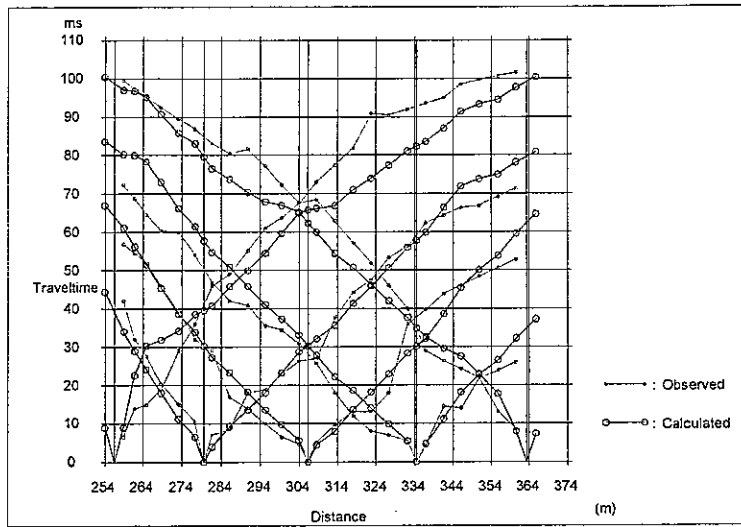
### DROMOCRÓNICAS



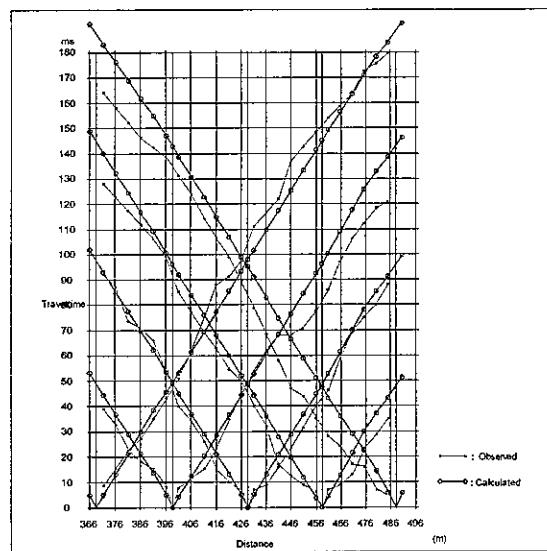
### Tendido No.1



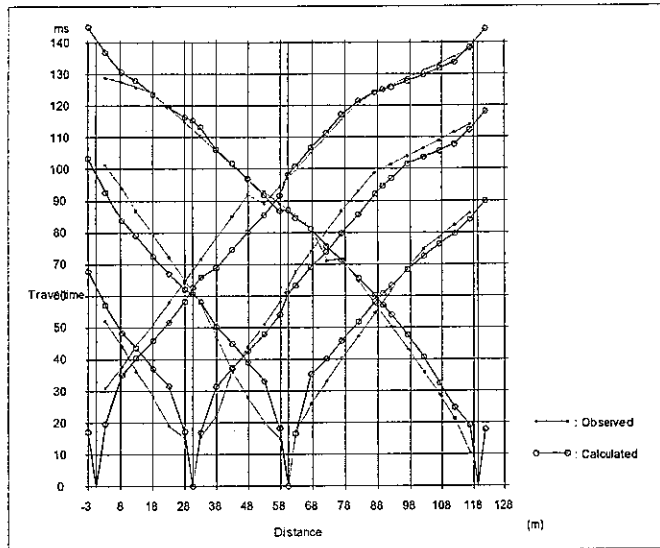
### Tendido No.2



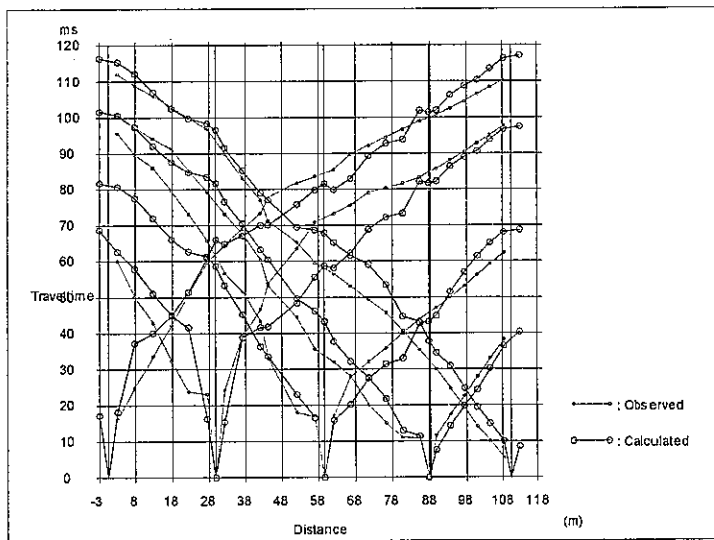
Tendido No.3



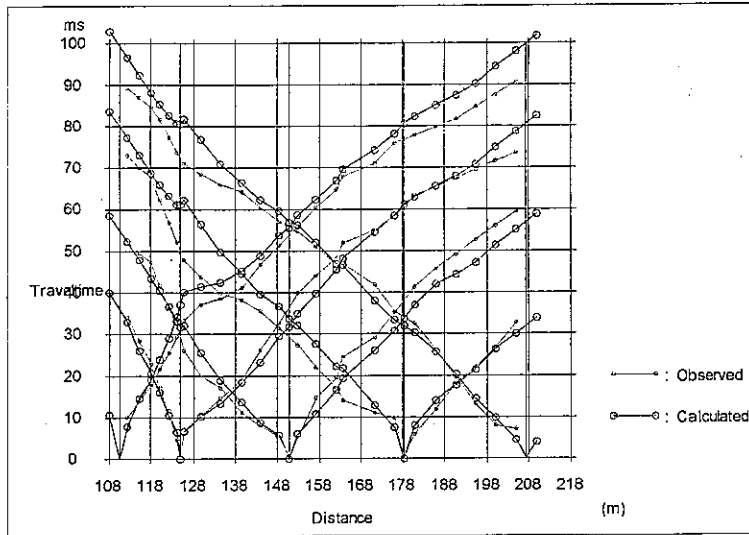
Tendido No.4



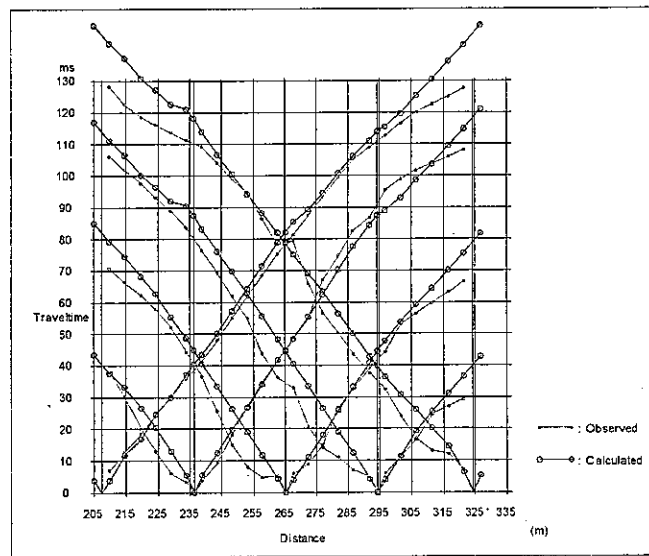
Tendido No.5



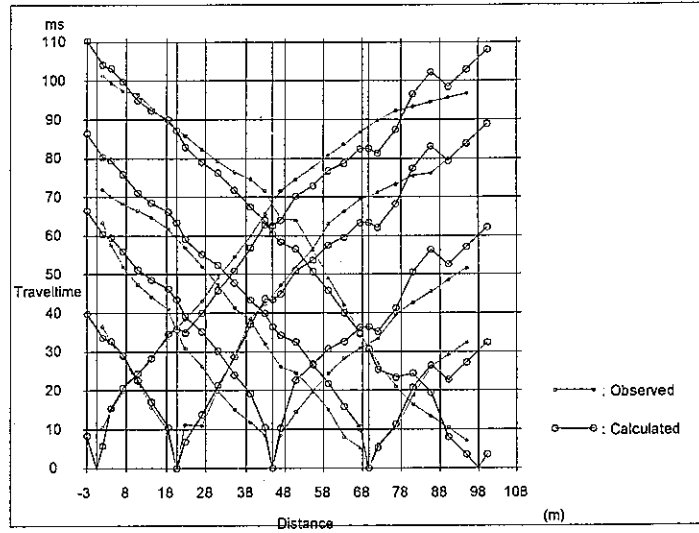
Tendido No.6



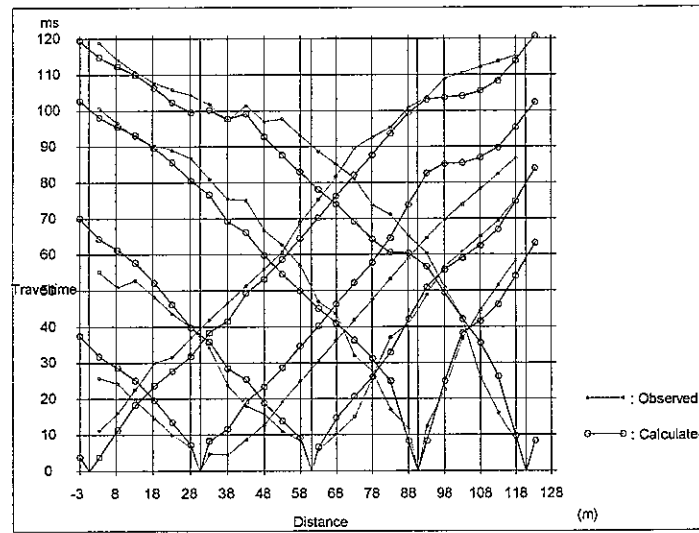
Tendido No.7



Tendido No.8

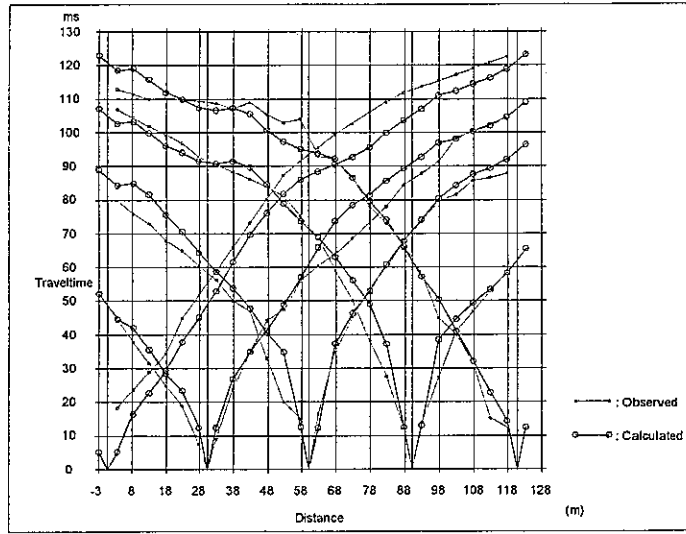


Tendido No.9

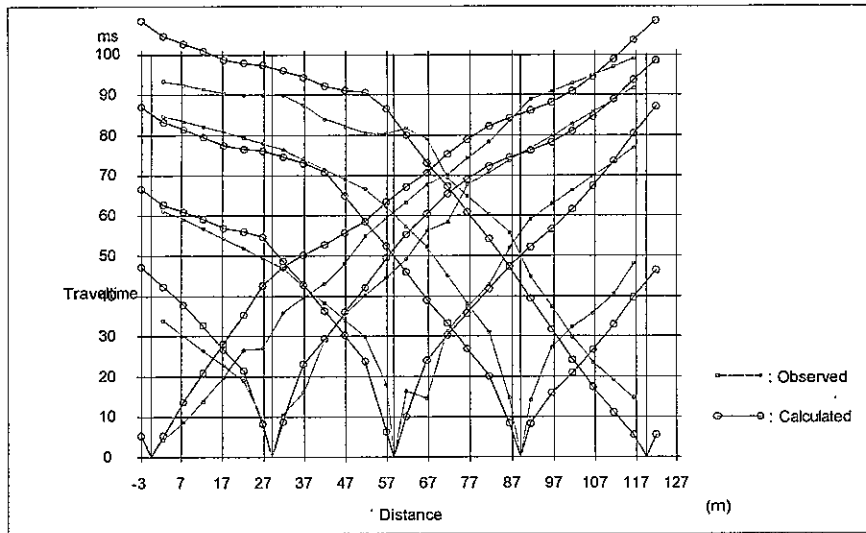


Tendido No.10

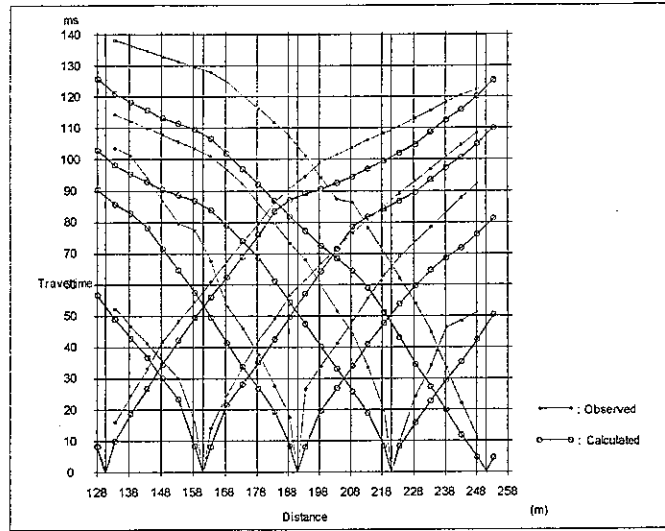




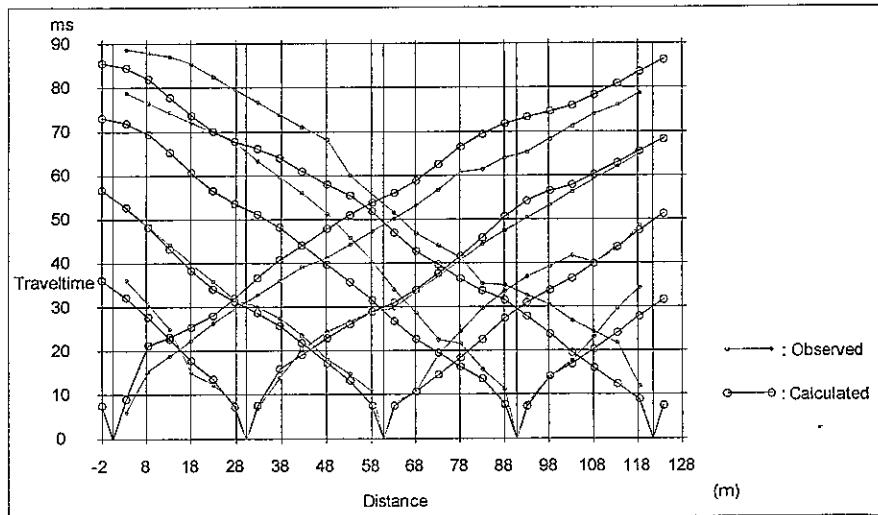
Tendido No.11



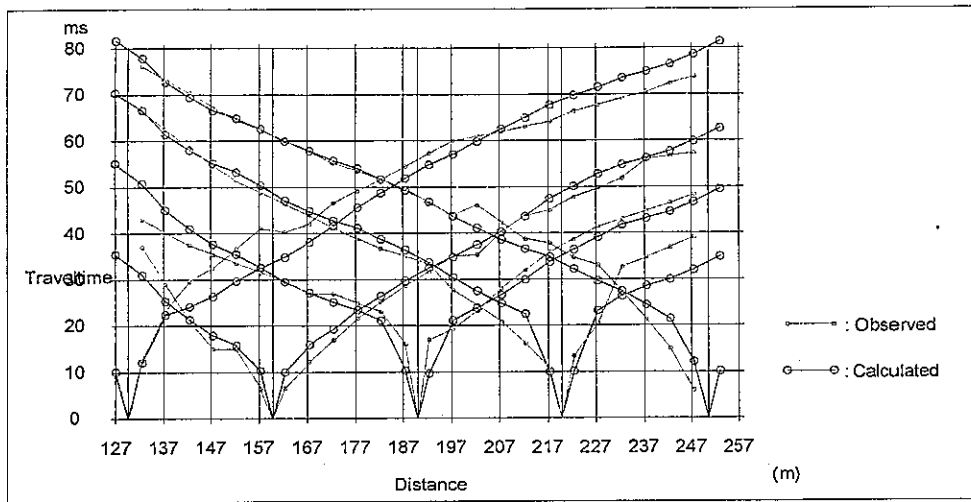
Tendido No.12



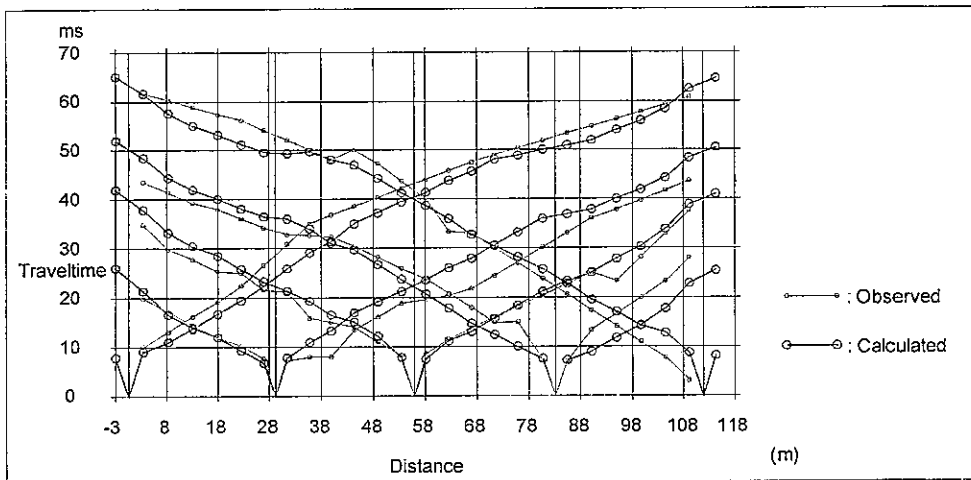
Tendido No.13



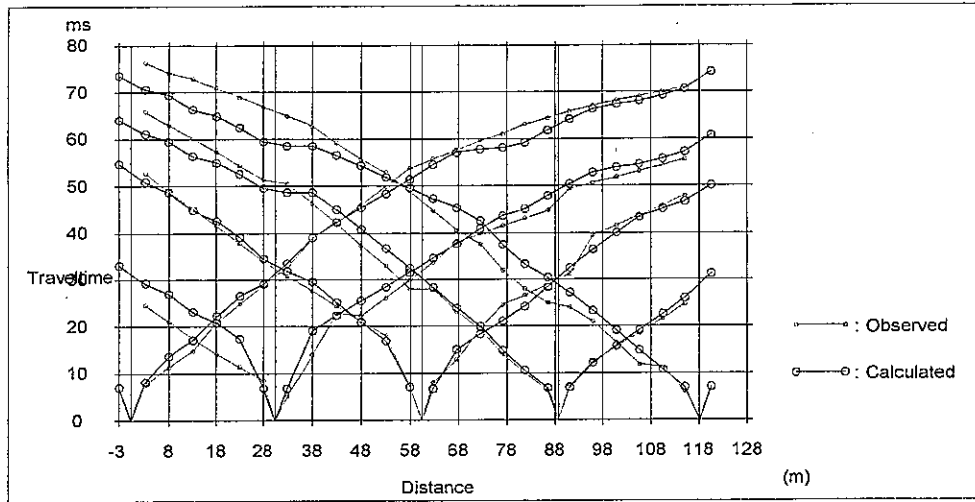
Tendido No.14



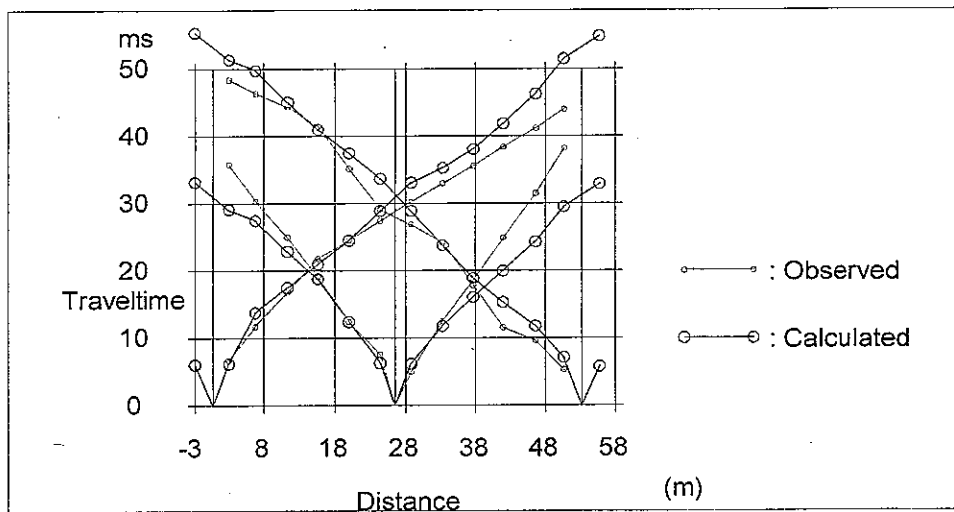
**Tendido No.15**



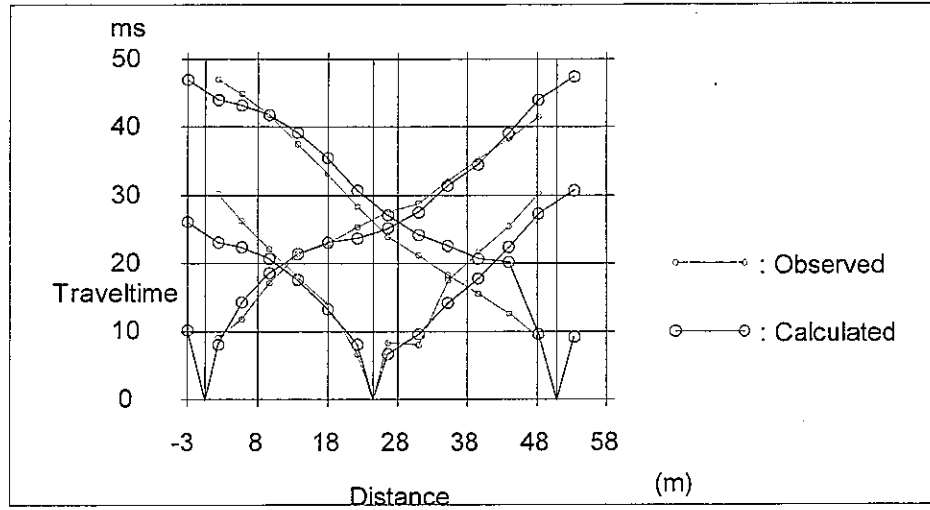
**Tendido No.16**



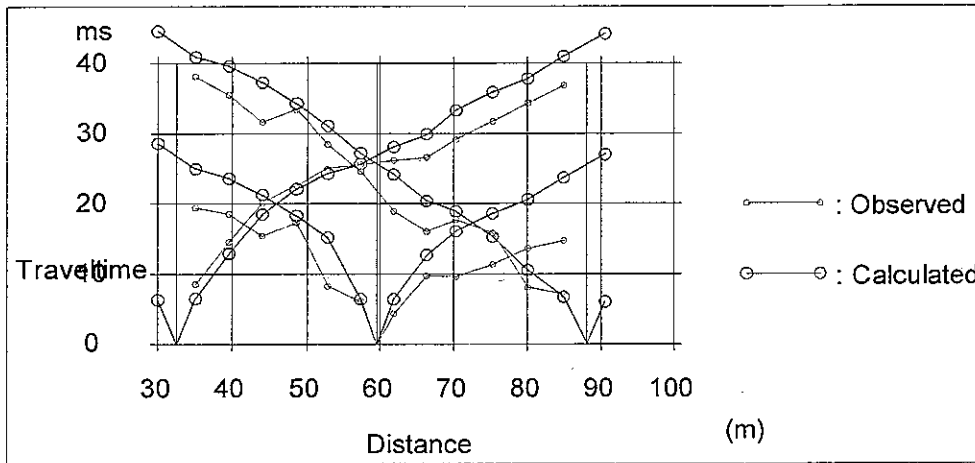
Tendido No.17



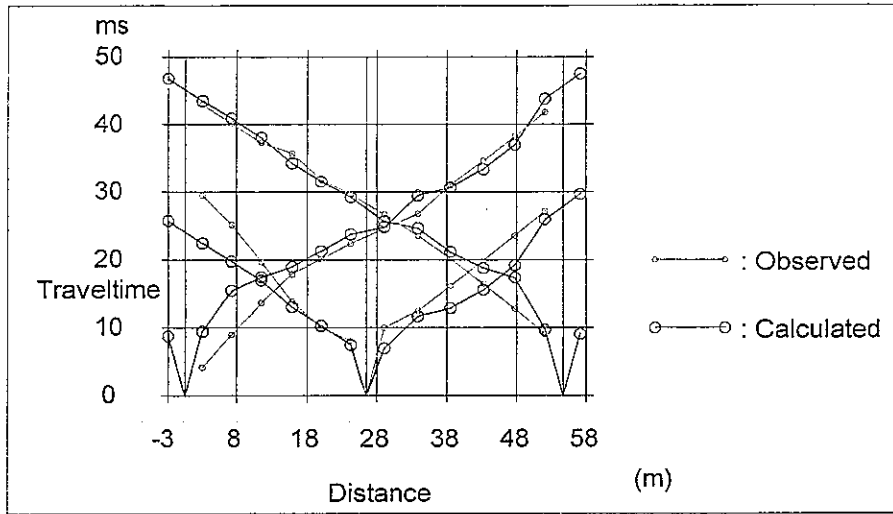
Tendido No.18



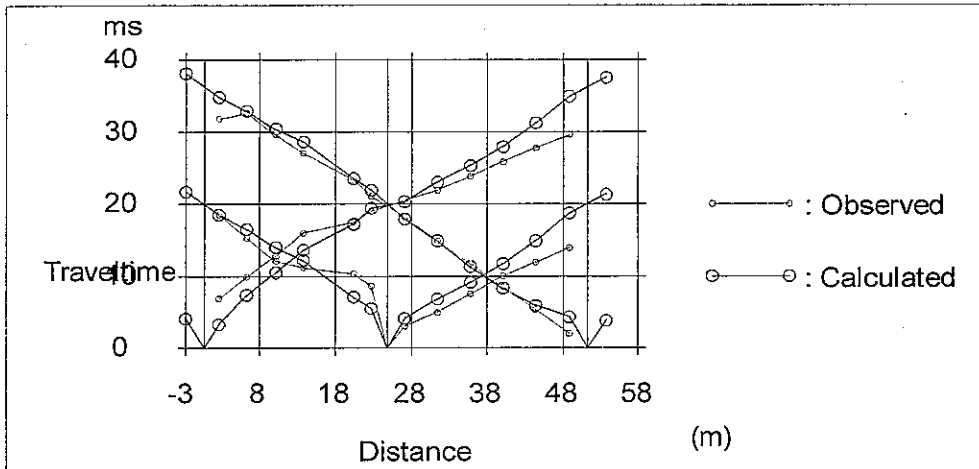
Tendido No.19



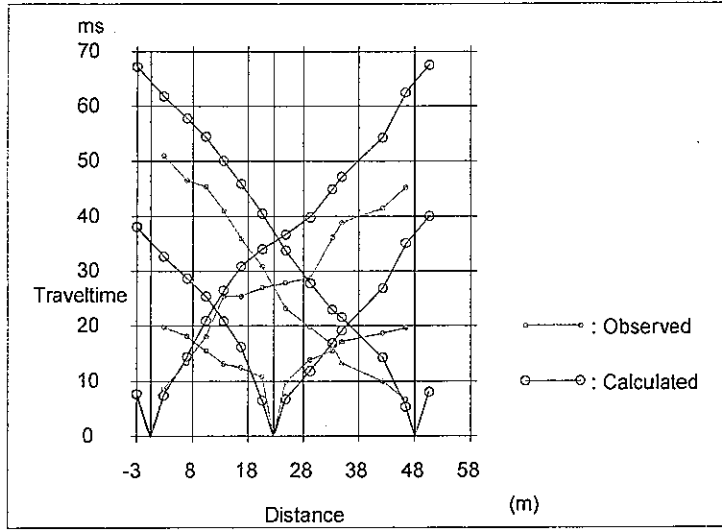
Tendido No.20



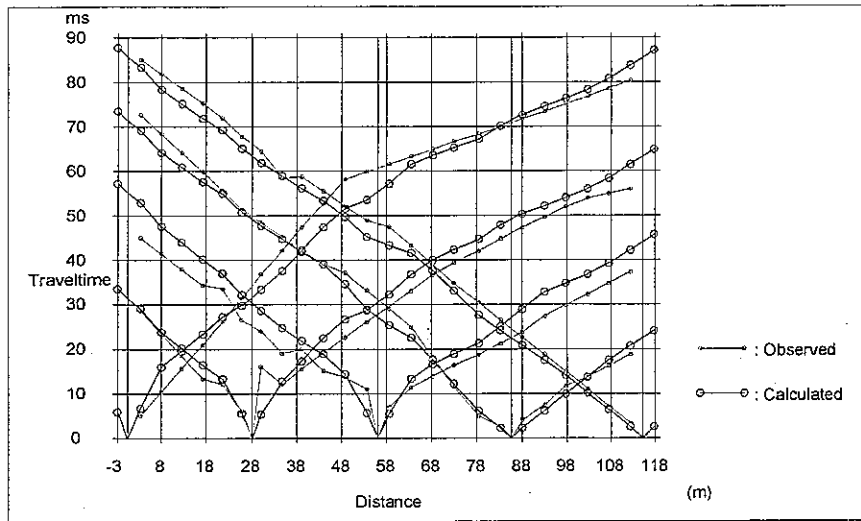
Tendido No.21



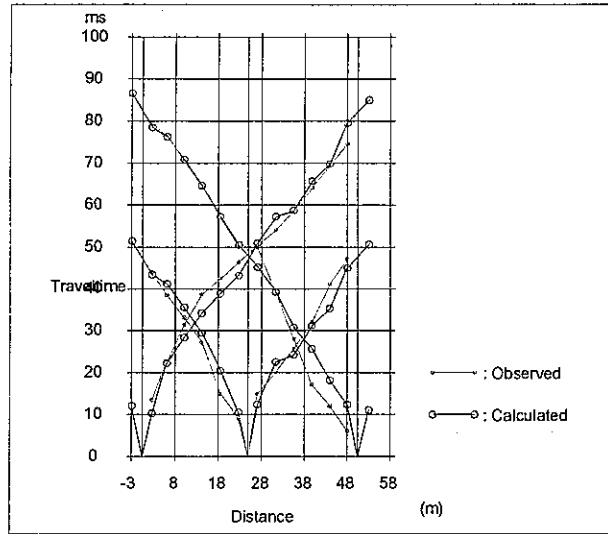
Tendido No.22



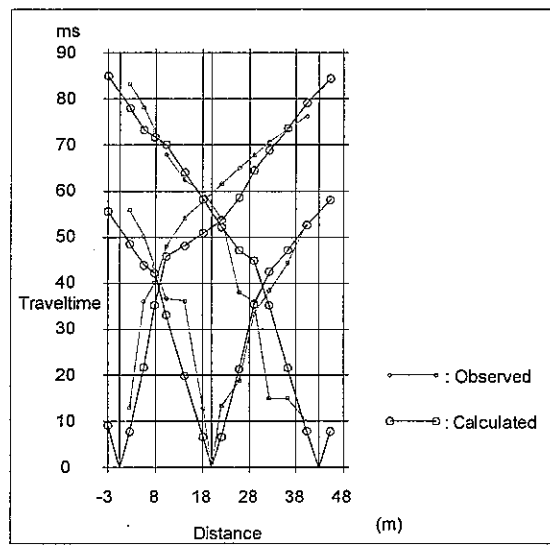
Tendido No.23



Tendido No.24

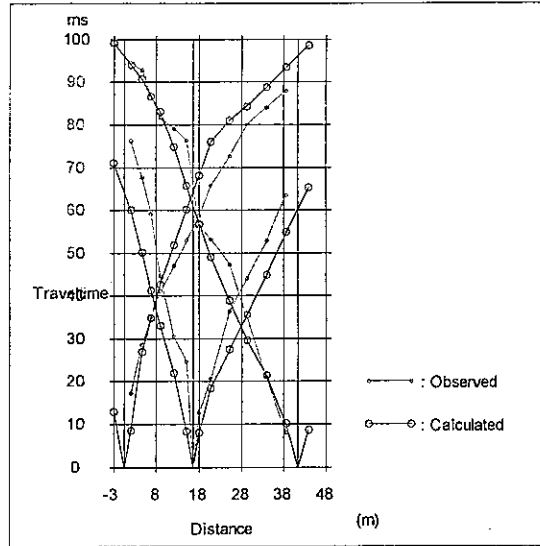


Tendido No.25

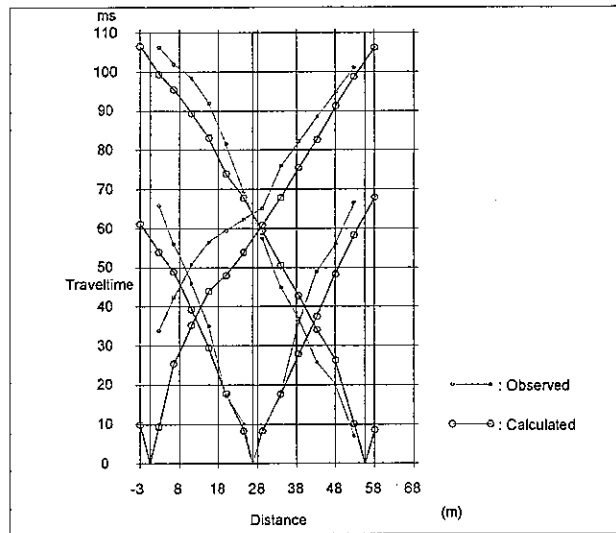


Tendido No.26

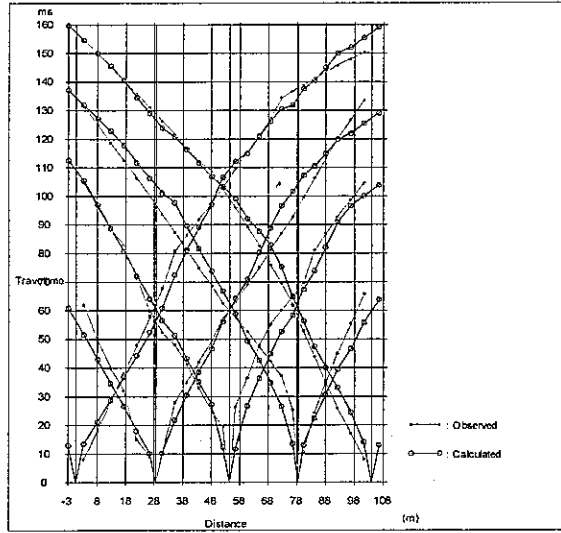




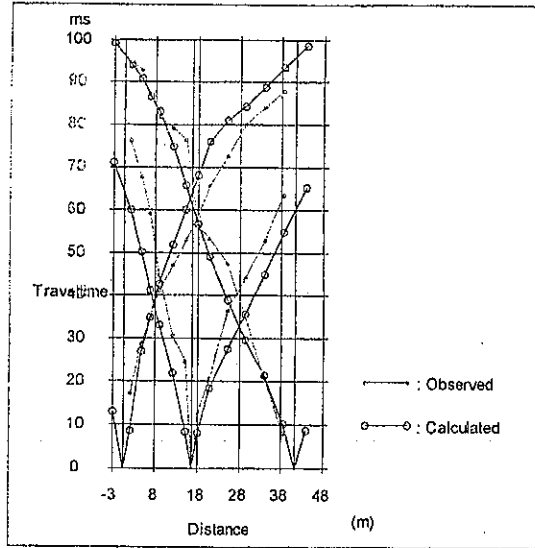
**Tendido No.27**



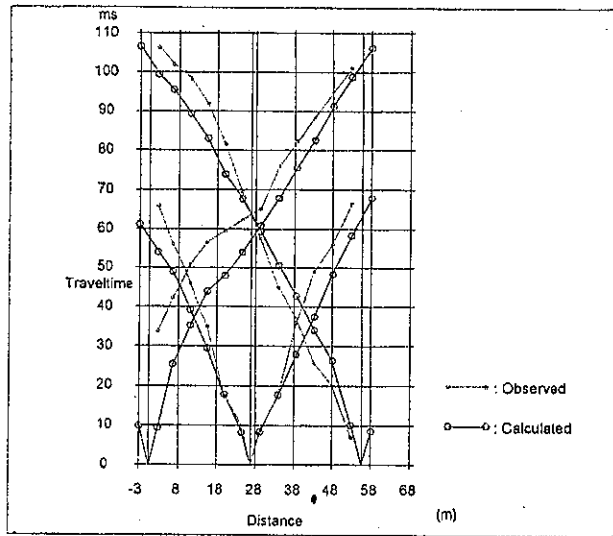
**Tendido No.28**



Tendido No.29



Tendido No.27



Tendido No.28