



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ACATLÁN

ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EVALUAR EL RIESGO QUE REPRESENTAN LOS CRESTONES DE ROCA SITUADOS EN LAS FALDAS DEL CERRO DEL CHIQUIHUITTE, DELEGACIÓN GUSTAVO A. MADERO, MÉXICO, D. F., QUE CAUSAN DAÑOS A LAS VIALIDADES: HUITZILLOPOCHTLI, OTOÑO Y VERANO.

TESINA

QUE PARA OBTENER LA ESPECIALIDAD EN:

GEOTECNIA

PRESENTA:



MIGUEL ÁNGEL HERNÁNDEZ VERA

ASESOR: DR. JOSÉ MARÍA CHÁVEZ AGUIRRE

ACATLÁN ESTADO DE MÉXICO, MAYO 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## CONTENIDO

### **ESTUDIO GEOTÉCNICO PARA EVALUAR EL RIESGO QUE REPRESENTAN LOS CRESTONES DE ROCA SITUADOS EN LAS FALDAS DEL CERRO DEL CHIQUIHUIE, DELEGACIÓN GUSTAVO A. MADERO, MÉXICO, D. F., QUE CAUSAN DAÑOS A LAS VIALIDADES: HUITZILOPOCHTLI, OTOÑO Y VERANO.**

1.	SITUACION ACTUAL EN EL MEDIO DE TRANSPORTE TERRESTRE .....	1
2.	NOTAS PRELIMINARES .....	3
3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
4.	TRABAJOS DE CAMPO .....	7
5.	TRABAJOS DE GABINETE .....	22
6.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	
6.1.	Reconocimiento Geológico .....	31
6.2.	Ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) .....	37
6.3.	Ejecución de Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) .....	50
6.4.	Determinación de los Módulos Elásticos Dinámicos .....	65
6.5.	Análisis de Estabilidad de Taludes .....	66
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	69
8.	REFERENCIAS .....	77

## 1. SITUACION ACTUAL EN EL MEDIO DE TRANSPORTE TERRESTRE

El crecimiento irregular de la mancha urbana en el Distrito Federal ha ocasionado que se urbanicen zonas de laderas potencialmente inestables. Un caso típico es el Cerro Chiquihuite, donde existen asentamientos irregulares que están en zonas de peligro por deslizamiento, volteo y caída de rocas (figura 1). El Cerro Chiquihuite forma parte de la Sierra de Guadalupe y está localizado al norte del Distrito Federal, en la Delegación Gustavo A. Madero. Geológicamente se trata de un domo volcánico de carácter exógeno constituido por rocas dacíticas dispuestas en unidades de flujo con espesores variables, muy intemperizadas, fracturadas y afalladas. Sin embargo, el entorno geológico en la que se encuentra ha traído desde hace tiempo problemas que han afectado a la población y en nuestro caso a las vías terrestres. (Figura 2).

Estos asentamientos, en su mayoría, se ubican en zonas de riesgo debido al peligro de derrumbes presentes en el lugar, tal es el caso de las siguientes colonias y avenidas importantes:

- Barrio San Juan Ticomán, se encuentra al sureste del cerro
- Barrio La Candelaria Ticomán, al sur del cerro
- La Pastora, al suroeste del cerro
- Benito Juárez, al oeste del cerro más al sur del Arbolillo
- El Arbolillo, al oeste
- Ampliación Benito Juárez, al oeste
- Castillo el Grande, se encuentra al oeste del cerro
- Cuauhtepac de Madero, se encuentra al oeste-noroeste
- Cuauhtepac del Carmen, al noroeste
- Castillo el Chico, al noroeste
- Ahuehuetes, al noroeste
- Tlalpexco, al norte



Figura 1. Asentamientos no planificados de lugareños

Los deslizamientos de roca han sido tan frecuentes en los últimos días en esta avenida, que han generado una zona de peligro, lo que implica una amenaza para los habitantes, para las viviendas y para los ocupantes de vehículos. Figura 3.

La Delegación Gustavo A. Madero tiene excelentes vías de comunicación, por encontrarse ubicado en los límites con la capital del país, y cuenta además con ferrocarril con sus ramales para las industrias, que va de México a Veracruz.

La carretera federal México-Pachuca, el boulevard Vía Morelos y el Río de los Remedios, son vías de comunicación que cruzan de norte a sur; de oriente a poniente. Actualmente, se realiza una fuerte inversión económica en los trabajos que se vienen desarrollando en la construcción del Circuito Exterior Mexiquense, que permitirá comunicar tanto al municipio como a toda la ciudad de México.

Con esta red de carreteras de intercomunicación se puede tomar para Querétaro, Oaxaca, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, Pachuca, etc.

El servicio de transporte foráneo de pasajeros y carga es proporcionada por 18 líneas de autobuses que comunican a todo el municipio.

La mayor parte de las ciudades de México enfrentan graves problemas de congestión vehicular, este problema se agrava debido a una falta de una adecuada planificación del crecimiento urbano como es este caso en particular. Generalmente, en países como el nuestro las ciudades crecen sin un ordenamiento territorial y sin considerar las necesidades de una infraestructura vial futura, lo que conlleva tanto a enormes problemas de asentamiento humano como a conflictos de uso de suelo. Actualmente corre por la Delegación Gustavo A. Madero el tren Suburbano que agiliza el transporte de mucha gente hacia el norte de la ciudad de México y poblaciones del Estado de México.



Figura 2. Alto riesgo que presentan los caídos de roca en la vialidad de Verano.



Figura 3. Caídos de roca en la avenida: Huitzilopochtli

## 2. NOTAS PRELIMINARES

Los métodos Geofísicos son rápidos, económicos y confiables. Por estas razones se decidió utilizar y presentar los nuevos desarrollos tecnológicos, tales como nuevos tipos de sondaje Geoeléctrico y Geofísico, programas computacionales y equipos diseñados en nuestro país, aplicados a la necesidad de resolver daños ocasionados a las vías terrestres. Los métodos Geofísicos son los de mayor aplicación en Ingeniería Geológica, con su mayor aplicación que son los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y los Tendidos de Refracción Sísmica (TRS), por lo que estos métodos serán manejados en este trabajo. Se plantearán sitios donde se estime que en el subsuelo a poca profundidad se presenten variaciones significativas de la resistividad como consecuencia de la presencia de basamento, rocas compactas, zonas de fracturamiento; se compararán ambos métodos, donde se señalarán las ventajas e inconvenientes de cada método y por último y lo más significativo, una alternativa de solución para las principales avenidas de comunicación.

Una de las propiedades que está vinculada a la presencia de agua en las rocas, es la resistividad eléctrica, lo cual ha generado el desarrollo de una tecnología específicamente enfocada a su medición y a la búsqueda de alternativas para evitar daños en las vialidades vecinas.

Se plantea la remediación de los pilares o crestones de roca situados entre las avenidas de Huitzilopochtli, Otoño y Verano, sobre las faldas del Cerro del Chiquihuite que constituyen las denominadas Manzanas 15 y 16, como se indica en la figura 4 (Ubicación de escarpes, TRS, SEV y PT); por tal motivo recientemente se realizaron estudios geotécnicos y geológicos del macizo rocoso, a fin de diseñar el tipo de remediación que garantice la estabilidad total de estos crestones o escarpes rocosos ante sollicitaciones estáticas y dinámicas del sitio y poner a salvo de derrumbes o caídos sobre las vialidades citadas.

La ejecución de un levantamiento geológico a detalle y de mediciones geofísicas en diferentes líneas de exploración distribuidas a todo lo largo de las avenidas principales (Huitzilopochtli, Otoño y Verano), fue la mejor opción de estudio, debido a que se consideró que estos métodos constituyen una buena forma para analizar al macizo rocoso constituido fundamentalmente por paquetes alternados de tobas y dacitas.

El desarrollo de este trabajo consiste en:

- a) Un Levantamiento geológico a detalle en el costado Poniente del Cerro del Chiquihuite y con especial cuidado en los escarpes o crestones de roca que conforman el subsuelo de las Manzanas 15 y 16.
- b) Una exploración Geosísmica, que comprenden 7 Tendidos de Refracción Sísmica ( TRS ), de 60 y 100 m de longitud cada uno distribuidos en las 3 avenidas principales, debido a que permiten cuantificar hasta una profundidad aproximada de 25 a 40 m, las velocidades de propagación longitudinal "P" y de cortante "S", así como características físicas de los materiales presentes en el sitio; parámetros a partir de los cuales fue posible determinar sus módulos elásticos dinámicos, esto es: Coeficiente de Poisson, Módulo de Cortante y Módulo de Elasticidad de las diferentes capas que constituyen el subsuelo y a partir de su valoración estimar su competencia mecánica, calidad de roca, estimar su grado de fracturamiento, ángulo óptimo de reposo del talud y determinar las zonas removibles, arables o bien que requieren del

uso de explosivos para su extracción y desplazamiento de acuerdo con las tablas de arabilidad publicadas por los constructores de maquinaria pesada<sup>1</sup>, Cabe mencionar que los 3 TRS realizados en la avenida de Huitzilopochtli fueron de 100 m de longitud cada uno, mientras que los 4 restantes realizados en las avenidas de Otoño y Verano fueron de 60 m de longitud cada uno.

- c) Una exploración Geoeléctrica, que comprenden 8 Sondeos Eléctricos Verticales en modalidad *Schlumberger* ( SEV ) con aberturas electródicas ( AB/2 ) comprendidas en el intervalo de 3 a 300 m de longitud para determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, hasta una profundidad aproximada de 100 m.

---

<sup>1</sup> Las cuales se muestran en uno de los Anexos que acompañan al presente trabajo, y constituyen el punto de partida para elaborar un programa de tiempos y costos que represente eficientemente los trabajos de excavación y movimiento de tierras que se proyectan realizar para estabilizar dichos taludes.



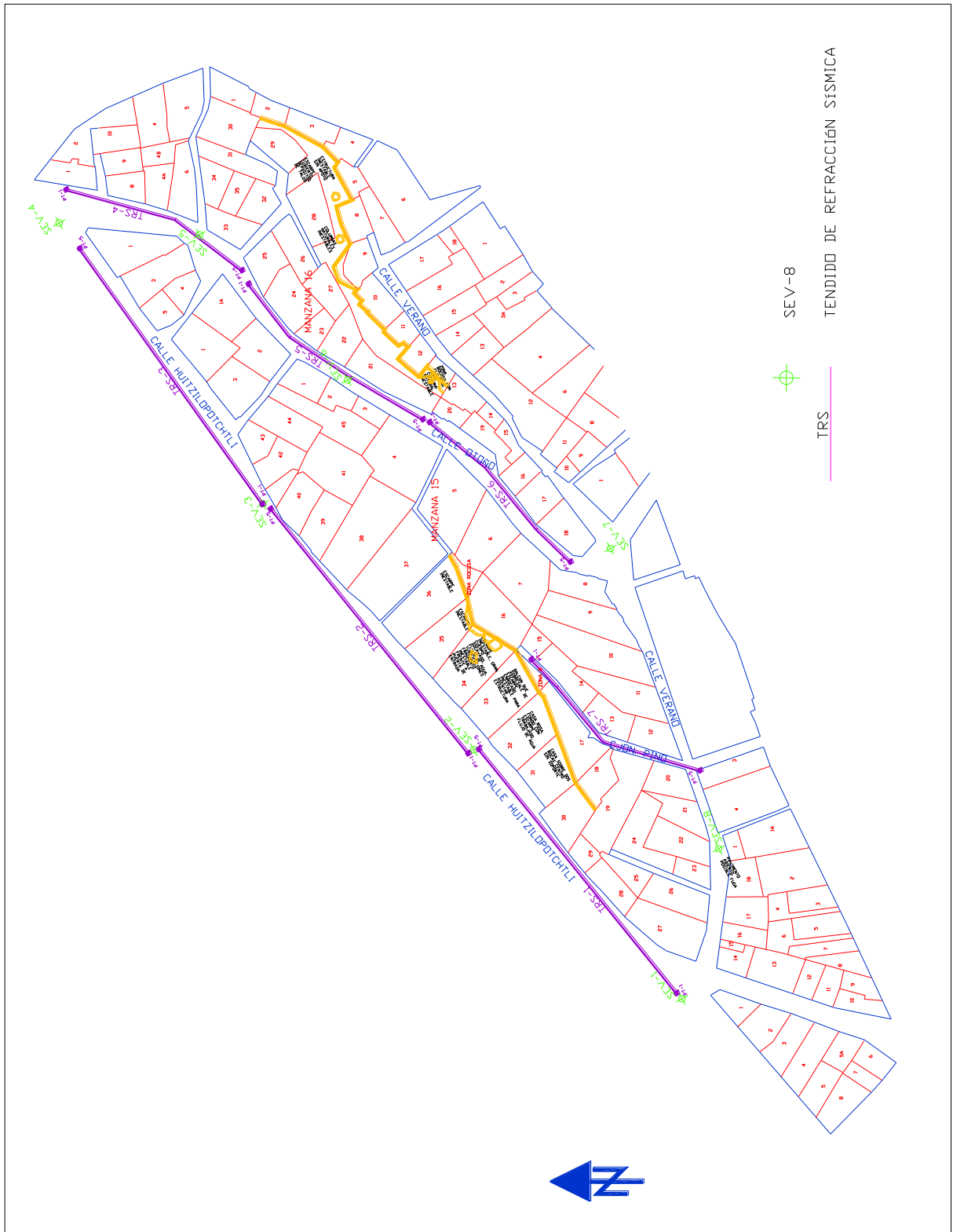


Figura 4. Ubicación de Escarpes, TRS Y SEV

La interpretación consiste en asociar los valores de resistividad y espesores calculados a estratos o formaciones Geológicas propias del área, de tal manera que los menores a 15 Ohm-m de resistividad corresponden a materiales arcillosos, los comprendidos en el intervalo de 15 a 25 Ohm-m a materiales limosos, de 25 a 40 Ohm-m a materiales areno-limosos, de 40 a 90 Ohm-m a materiales arenosos, de 90 a 400 Ohm-m a materiales gravosos y mayores a 400 Ohm-m a presencia de roca, dentro de estos últimos los de muy alta resistividad pudieran estar asociados a grandes fracturamientos y por consiguiente a muy alta permeabilidad.

Los materiales volcánicos que constituyen los escarpes rocosos en los tramos problemáticos, debieran presentar valores intermedios de resistividad dependiendo de su grado de saturación y fracturamiento, debido a que seguramente se alojan en la capa intemperizada o descomprimida tanto de las tobas como de las dacitas propias del área; mientras que los estratos arcillosos, limosos o con presencia de materia orgánica que conforman los materiales de cobertura, deberán de manifestarse a través de valores bajos a muy bajos de resistividad.

### 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio a detalle para evitar la posibilidad de rodamientos de rocas y deslizamientos de taludes a fin de garantizar a los pobladores un tránsito seguro por las vías principales como tema principal de este trabajo.
- Aplicaciones de la Prospección Geofísica:
  - Localización de Diaclasas
  - Detección y evaluación de fracturas
  - Determinación de resistividades para tomas de tierra.
  - Análisis de estabilidad de taludes.
  - Reconocimiento de macizos rocosos.
  - Medida de propiedades físicas de muestras de terreno.
- Determinar los espesores y resistividades de los diferentes materiales que constituyen el macizo rocoso en los escarpes rocosos y alrededores en cuestión, así como sus implicaciones estructurales en la estabilidad de los mismos.
- Determinar con base en las velocidades longitudinal "P" y transversal "S" de los diferentes estratos o paquetes presentes en el subsuelo y los valores de peso volumétrico, reportados por laboratorio o estimados en función de sus velocidades, los módulos elásticos dinámicos de cada uno de los estratos, esto es, el Coeficiente de Poisson, el Módulo de Elasticidad y el Módulo de Cortante, necesarios para determinar la calidad de roca del macizo y el diseño de la estabilidad de los taludes.
- Correlacionar las resistividades, velocidades de propagación y los módulos elásticos dinámicos obtenidos con las características litológicas y geotécnicas de los diferentes paquetes de roca que constituyen la estratigrafía.
- Determinar el modelo estratigráfico de cada uno de los 2 crestones de roca estudiados en detalle a partir de la interpretación de los resultados obtenidos con los TRS y SEV ya integrados con los resultados del levantamiento geológico.
- Determinar los ángulos óptimos de reposo de los crestones de roca.
- Proponer soluciones de remediación.

#### 4. TRABAJOS DE CAMPO

- Las colonias Candelaria Ticomán y San Juan y Guadalupe, ubicadas en la porción sur del Cerro del Chiquihuite están expuestas a deslizamiento y caída de rocas por lo que se llevó a cabo un estudio Geológico. Como parte de la metodología se realizó un levantamiento a detalle y un inventario de los bloques potencialmente inestables, se tomaron datos de fracturamiento y se caracterizaron los sitios mediante fichas de control. Una vez que se integró la información se realizaron dos tipos de zonificación: geológica y geotécnica. La primera consistió en sobreponer en un sistema de información geográfica variables como pendiente, litología y características del fracturamiento, con el fin de generar un mapa de peligros. La segunda zonificación consistió en la caracterización de zonas de bloques con el fin de identificar el mecanismo potencial de falla y establecer las soluciones geotécnicas para salvaguardar las avenidas de tránsito de vehículos y pasos peatonales.
- **Reconocimiento geológico** a todo lo largo y ancho del tramo y a detalle en los 2 crestones de roca, con el fin de muestrear y cartografiar los diferentes tipos de material y se presenta además, el peligro latente de la población que se aloja sobre estos crestones de roca, como se muestran en las siguientes figuras.

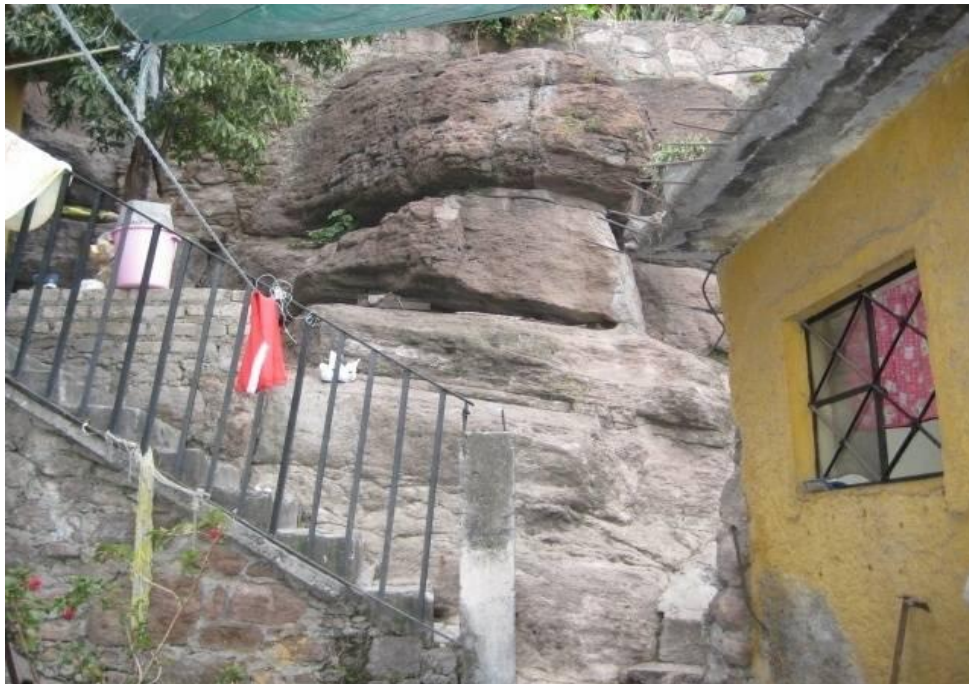


Figura 5. Manzana 15 – Lote 34.  
Bloque de roca diferenciado del macizo por planos horizontales socavados.



Figura 6. Manzana 15 – Lote 33.

Del relleno de roca sobresale el tronco y ramas de un árbol que obviamente propician el deterioro de la roca.



Figura 7. Manzana 15 – Lote 31.



Figura 8. Vista general del escarpe presente en la manzana 16. Nótese las diaclasas con echado ligeramente macizo adentro, que concurre sobre la avenida de Otoño.

- **Exploración Geoeléctrica** consistente en el levantamiento de 8 SEV en la modalidad *Schlumberger* con aberturas electródicas ( $AB/2$ ) comprendidas en el intervalo de 3 a 300 m de longitud para determinar la estratigrafía presente en el subsuelo, hasta una profundidad aproximada de 100 m. Estos SEV se distribuyeron espaciadamente a todo lo largo y ancho de la zona de estudio en cuestión, realizando los 4 primeros a lo largo de la avenida de Huitzilopochtli, los siguientes 3 sobre la avenida de Otoño y el último en la avenida de Verano (ver Figura 4), con el fin de lograr una buena cobertura que permitiera obtener un modelo estratigráfico y estructural que informara de la posible continuidad horizontal y vertical de los materiales que constituyen el subsuelo, así como de sus planos de discontinuidad. Se anexan figuras del procedimiento en campo sobre la ejecución de los SEV.



Figura 9. Para realizar los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), es necesario barrenar el pavimento, con el objetivo de que los electrodos de potencial y corriente se encuentren en contacto directo con el terreno natural. SEV-1, esquina de Huitzilopochtli y Verano.



Figura 10. Colocación de electrodos dentro de los barrenos perforados, para la realización del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV-2), sobre la avenida Huitzilopochtli.



Figura 11. Se emplea cinta métrica para medir la distancia desde el centro del SEV hasta la posición donde se debe perforar el terreno para hincar los electrodos en avenida Otoño

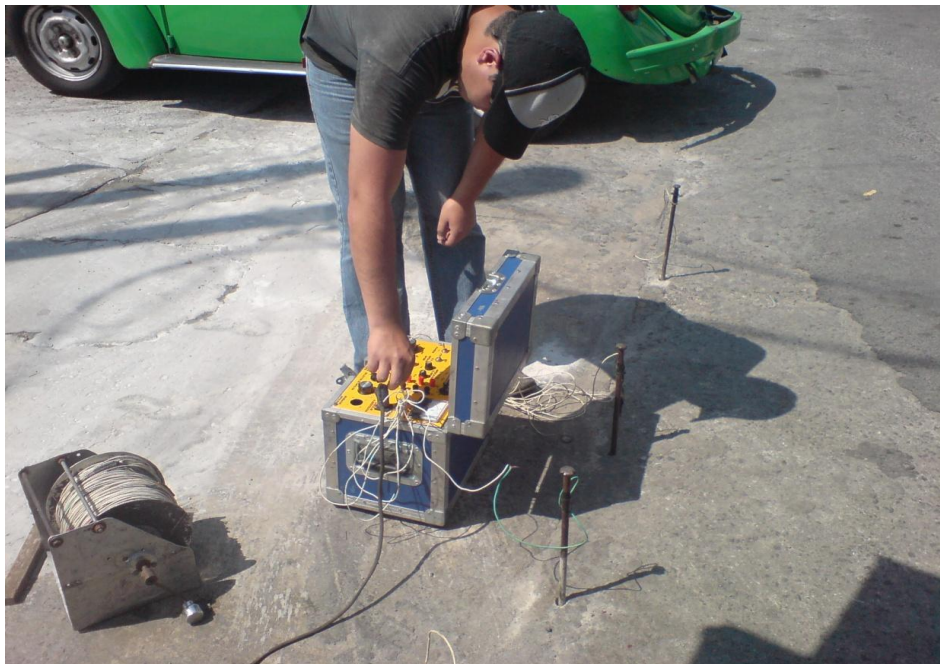


Figura 12. Operación del equipo de resistividad para la realización del SEV-4. Se observa que los electrodos de potencial y corriente se encuentran simétricamente colocados, con respecto a la posición de la estación base.





Figura 13. Barrenos realizados en la avenida de Otoño casi esquina con Palma, para la realización del Sondeo Eléctrico Vertical, SEV-5.



Figura 14. El equipo de resistividad permite controlar la corriente suministrada al terreno y medir la diferencia de potencial entre los electrodos. Con estos parámetros es posible calcular la resistividad aparente del terreno, SEV-5, sobre avenida Otoño.



Figura 15. El equipo de resistividad se alimenta de una planta que genera la corriente eléctrica que se hace fluir por el subsuelo de la zona de estudio, SEV-5, sobre avenida Otoño.

- **Exploración Geosísmica** realizada por medio de 3 TRS de 100 m de longitud cada uno realizados a lo largo de la avenida de Huitzilopochtli y 4 TRS de 60 m de longitud cada uno realizados a lo largo de las avenidas de Otoño y Verano (ver Figura 4). Con el fin de determinar velocidades longitudinales y transversales de propagación hasta una profundidad de aproximadamente 25 a 40 m, suficiente para caracterizar el subsuelo somero de la ladera y en particular los macizos rocosos en cuestión. Las siguientes figuras muestran los procedimientos, equipos y ejecución de los TRS.



Figura 16. Geófono de 4.5 Hz empleado para el registro de las ondas elásticas que se propagan por el subsuelo debido al impacto del marro.



Figura 17. Sismógrafo marca *Geometrics* empleado para el estudio geosísmico en la avenida de Huitzilopochtli.



Figura 18. Colocación del cable de disparo durante la realización del Tendido de Refracción Sísmica, TRS-1, en la avenida de Huitzilopochtli.

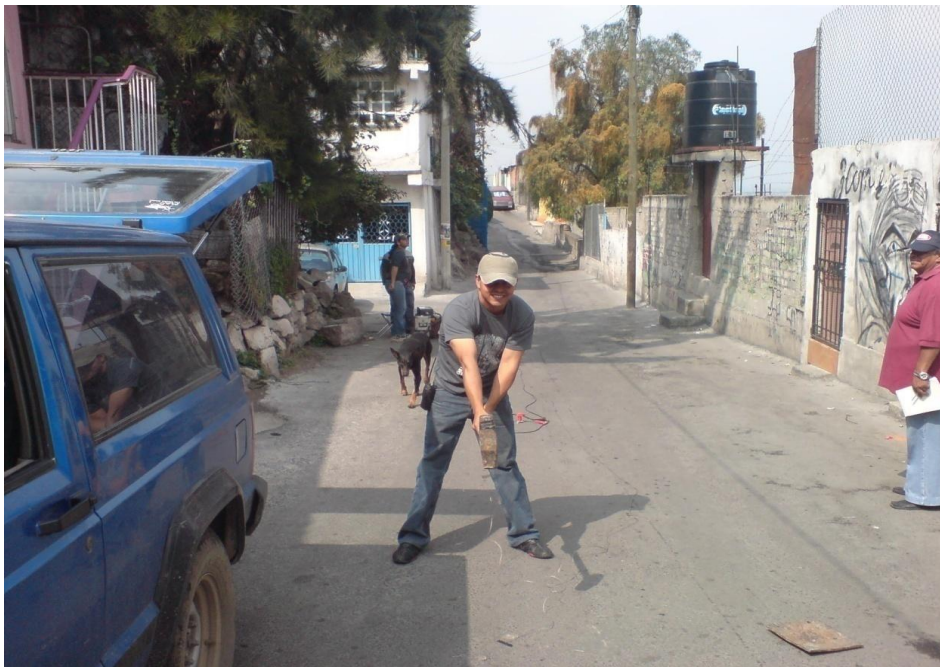


Figura 19. Impacto del marro sobre el terreno para la generación de ondas elásticas. Punto de Tiro 1, Tendido de Refracción Sísmica, TRS-1, en la avenida de Huitzilopochtli.



Figura 20. Operación del sismógrafo de doce canales durante la realización del Tendido de Refracción Sísmica, TRS-2, sobre la avenida Huitzilopochtli.



Figura 21. Punto de impacto común para los TRS-1 y TRS-2. Se muestra una sección en corte en peligro de derrumbe sobre la avenida Huitzilopochtli



Figura 22. Control de calidad de los registros sísmicos durante la operación en campo.



Figura 23. Arreglo lineal de los geófonos sobre el terreno para el registro de los frentes de ondas elásticas que se propagan a través del subsuelo, sobre la avenida de Palma.



Figura 24. Sismógrafo y computadora portátil empleados para la realización de los Tendidos de Refracción Sísmica en la avenida de Otoño y en el callejón Pino.



Figura 25. Estación base para los Tendidos de Refracción Sísmica, TRS-5 y TRS-6, realizados en la avenida de Otoño.



Figura 26. Detector sísmico (geófono), de 4.5 Hz empleado para detectar la vibración del terreno debida al impacto del marro sobre el terreno.



Figura 27. Punto de Tiro central para el Tendido de Refracción Sísmica, TRS-5, sobre la avenida de Otoño





Figura 28. Punto de Tiro 1 (PT-1), correspondiente al Tendido de Refracción Sísmica, TRS-6, realizado en la avenida de Otoño.



Figura 29. Segundo Punto de Tiro del Tendido de Refracción Sísmica, TRS-6, sobre la avenida de Otoño, se muestra a un costado una sección en corte, en riesgo para el paso de vehículos.



Figura 30. Estación base correspondiente al Tendido de Refracción Sísmica, TRS-7, realizado en el callejón Pino.

Por último, en cada TRS se colocaron en forma colineal puntos de excitación sísmica del terreno (figura 23), conocidos como Puntos de Tiro (PT) (figuras 19, 27, 28 y 29), y pequeños transductores, mejor conocidos como geófonos, que registraron las señales provenientes del subsuelo y enviaron la señal a un aparato que las amplificó y registró digitalmente denominado sismógrafo. Cada TRS se realizó con 5 PT (2 en los extremos a 2.5 ó 4.0 m del geófono más cercano y 3 intermedios ubicados entre los geófonos<sup>1</sup> 3-4, 6-7 y 9-10), así como 12 geófonos detectores separados en intervalos de 5 u 8 m con el fin de alcanzar profundidades mínimas de investigación del orden de los 25 a 40 m, suficiente para caracterizar el subsuelo de los macizos rocosos inestables y zonas intermedias. (figura 16 y 26).

En los trabajos de campo se utilizó un sismógrafo digital marca *Nimbus Geometrics* y modelo *Smartseis* de 12 canales, impresión en papel electrostático, grabación en disco duro y selectores de filtros, amplitudes y grado de sensibilidad (ganancias), para cada traza. Los sismogramas se grabaron digitalmente, para su posterior análisis a través de una computadora portátil y el empleo del programa de cómputo *SIPIK*, el cual interactúa entre la computadora del sismógrafo y el intérprete permitiendo la grabación en discos. (figuras 17, 20 y 24)

Los geófonos sismodetectores fueron *Mark Products* de componente vertical de 28 Hz, los cuales captaron las vibraciones provenientes del subsuelo como consecuencia de los golpes realizados en la superficie del mismo con un martillo de 12 lbs, conectado a un interruptor de impacto el cual activa el sismógrafo en el momento en que se origina la perturbación o excitación.

<sup>1</sup> Los geófonos son [transductores](#) de desplazamiento, velocidad o aceleración que convierten el movimiento del suelo en una señal eléctrica. Casi todos los geófonos empleados para la prospección [sísmica](#) en la superficie terrestre son del tipo electromagnético.

Mediante el uso de esta técnica fue posible determinar los tiempos de arribo de las ondas longitudinales "P" y de cortante "S" de los diferentes estratos que constituyen el subsuelo del sitio estudiado y por consiguiente poder determinar los perfiles sísmicos y los módulos elásticos dinámicos de los estratos que constituyen el subsuelo.

## 5. TRABAJOS DE GABINETE

Las pendientes pronunciadas donde se asienta la población más aun, este fenómeno se puede ver particularmente en la delegación Gustavo A. Madero, en el Cerro del Chiquihuite, donde hay zonas regulares e irregulares, con comunidades expuestas a desprendimientos de bloques y deslaves.

Hace poco más de un año que se está elaborando un Atlas de zonas de Riesgo del Distrito Federal. Un Atlas de Riesgo es la representación de posibles peligros (que ocurren constante) en una zona determinada, en este caso, el Cerro del Chiquihuite. Ahora bien, las discontinuidades del terreno, los daños que afectan las avenidas principales y los problemas de asentamientos humanos están prácticamente en todos lados, por eso es importante que exista un Atlas que marque vectores de construcción en beneficio de la comunidad y de los medios de las vías terrestres.

- **Reconocimiento Geológico:**

Los trabajos de gabinete correspondientes al levantamiento geológico consistieron en realizar las siguientes actividades:

- a) Describir rasgos geomorfológicos, afloramientos y características de las rocas y suelos presentes en el sitio estudiado. Ver figura 31 y 32.
- b) Plasmar en un plano los contactos de los diferentes cuerpos de roca y/o suelos que conforman el macizo rocoso en cuestión, así como lo rumbos y echados de las principales estructuras levantadas. Ver figura 4.

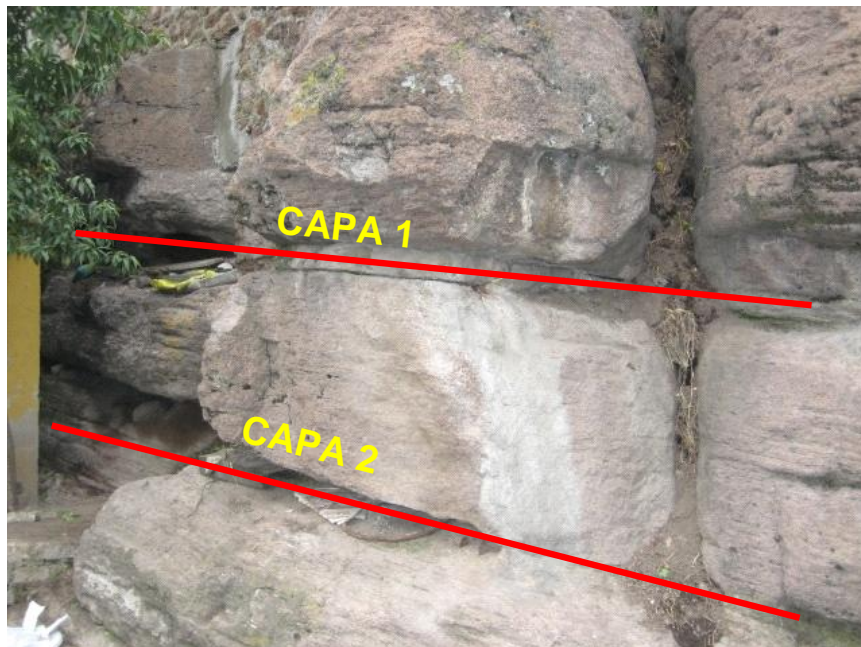


Figura 31. Manzana 15 – Lote 34.

Vista lateral del bloque de roca localizada en la pared del patio central del predio. Se observan dos capas horizontales socavadas y la discontinuidad vertical que separa al bloque del macizo.



Figura 32. Manzana 15 – Lote 34.

Filtraciones de agua y tubificaciones observadas en las discontinuidades verticales del macizo rocoso.

- **Exploración Geoeléctrica (SEV):**

Por lo que a los trabajos de gabinete de los SEV recolectados en campo se refiere, cabe señalar que se realizaron casi en su totalidad de forma automática, aplicándoseles las siguientes correcciones y procesos:

- a) Los SEV de campo se corrigieron por las variaciones laterales, propias de cada sitio de medición, y se interpretaron mediante técnicas gráficas, analíticas y programas de cómputo especializados a fin de obtener los modelos geoeléctricos representativos de las condiciones geológicas prevalecientes en el subsuelo, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 33. Equipo de resistividad empleado para realizar los estudios de resistividad en las avenidas de Huitzilopochtli, Otoño y Verano.

- b) Una vez corregidos por variaciones laterales, los 8 SEV se interpretaron mediante el uso de la paquetería *RESIXP*. Este programa afina el modelo estratigráfico elaborado inicialmente de acuerdo con el marco geológico de referencia y la interpretación cualitativa inicial. En las siguientes figuras se encuentran los resultados de este proceso para cada uno de los 8 SEV.
- c) Los modelos así obtenidos llevan implícito un error en la determinación de las profundidades de los contactos, no obstante lo sofisticado de los procesos actuales, debido a que en la interpretación de los métodos indirectos se realiza a través de una simplificación teórica de la propagación de la corriente eléctrica en el subsuelo, suponiendo condiciones ideales de isotropía y homogeneidad, las cuales distan mucho de serlo en la mayoría de los sitios; sin embargo, interpretaciones con un 90% de aproximación o menores a un 10% de error, son factibles y útiles para dirigir o programar las exploraciones consecuentes, como tal es la intención del presente trabajo.
- d) Finalmente, los resultados arrojados por el procesado de *RESIXP* fueron manejados a través de un paquete de interpretación de datos geofísicos, denominado *WINGLINK*, que permite construir perfiles geoeléctricos y configuraciones de valores de resistividad en planta a diferentes profundidades.

- **Exploración Geosísmica (TRS):**

Los TRS se realizaron en 3 etapas:

### PRIMERA ETAPA:

La primera consistió en determinar los perfiles sismo-estratigráficos de cada sitio estudiado, determinando para ello primeramente los tiempos de arribo de onda longitudinal "P" y transversal "S" a partir de la lectura de los sismogramas grabados digitalmente, para lo cual se utilizó la paquetería *SIPIK* que permite recuperar el registro sísmico en pantalla y seleccionar los tiempos de arribo tanto de las ondas longitudinales como transversales.

Una vez leídos los diferentes tiempos de arribo, se procedió a construir las curvas tiempo-distancia o dromocrónicas de los TRS, a partir de las cuales fue posible determinar, mediante el empleo de la paquetería *SIPIK*, el número de capas sismo-elásticas presentes en cada sitio de estación, sus espesores y distribución, así como sus velocidades de propagación longitudinal "Vp", y sus velocidades de cortante "Vs". Estos modelos se integraron con los obtenidos en las exploraciones Geoeléctrica y Geológica, como se muestran en las figuras 52 a la 65.

### SEGUNDA ETAPA:

Consistió en determinar los módulos elásticos dinámicos de los estratos que constituyen el subsuelo de cada sitio estudiado, para ello se utilizaron las relaciones derivadas de la propagación de ondas en medios continuos, las cuales establecen que los parámetros elásticos dinámicos de los materiales son función de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinal (Vp) y transversal o de cortante (Vs) que se propagan a través de él.

Con estos parámetros y la densidad ( $\rho$ ) o los pesos volumétricos ( $\gamma$ ) de los estratos involucrados en el sitio estudiado fue posible determinar los módulos elásticos dinámicos a partir de las siguientes ecuaciones:

#### Coefficiente de Poisson

$$\nu = \frac{0.5\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1}{\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1} \dots\dots\dots(1)$$

#### Módulo de Cortante

$$G = \rho V_S^2 \dots\dots\dots(2)$$

#### Módulo de Young

$$E = 2\rho V_S^2(1 + \nu) \dots\dots\dots(3)$$

En el cálculo de los módulos elásticos dinámicos se consideraron los valores de peso volumétrico estimados de acuerdo con sus valores de velocidad y tipo de material, los cuales fueron de 1.85 ton/m<sup>3</sup>

para los suelos residuales, depósitos de talud y/o materiales de cobertura, 2.20 ton/m<sup>3</sup> para la roca intemperizada o descomprimida, fracturada y parcialmente alterada constituida por dacitas intercaladas con tobas, y de 2.45 ton/m<sup>3</sup> para la roca sana o intacta que constituye el basamento geotécnico del área en estudio.

**TERCERA ETAPA:**

Fue posible integrar la información obtenida a través de los reconocimientos geológicos y los resultados de los TRS para caracterizar geotécnicamente cada uno de los materiales presentes, a fin de poder determinar su calidad, así como cuantificar en porcentajes las zonas removibles, arables o que requirieren del uso de explosivos para su fragmentación y posterior extracción, de acuerdo con las siguientes tablas de arabilidad publicada por los fabricantes de maquinaria pesada.



**DESGARRADORES**

RENDIMIENTO DEL DESGARRADOR

- D-9 R

**D-9 R**

- DESGARRADOR No. 9 DE UN VÁSTAGO O DE VÁSTAGOS MÚLTIPLES
- ESTIMADO USANDO LAS VELOCIDADES DE LAS ONDAS SÍSMICAS

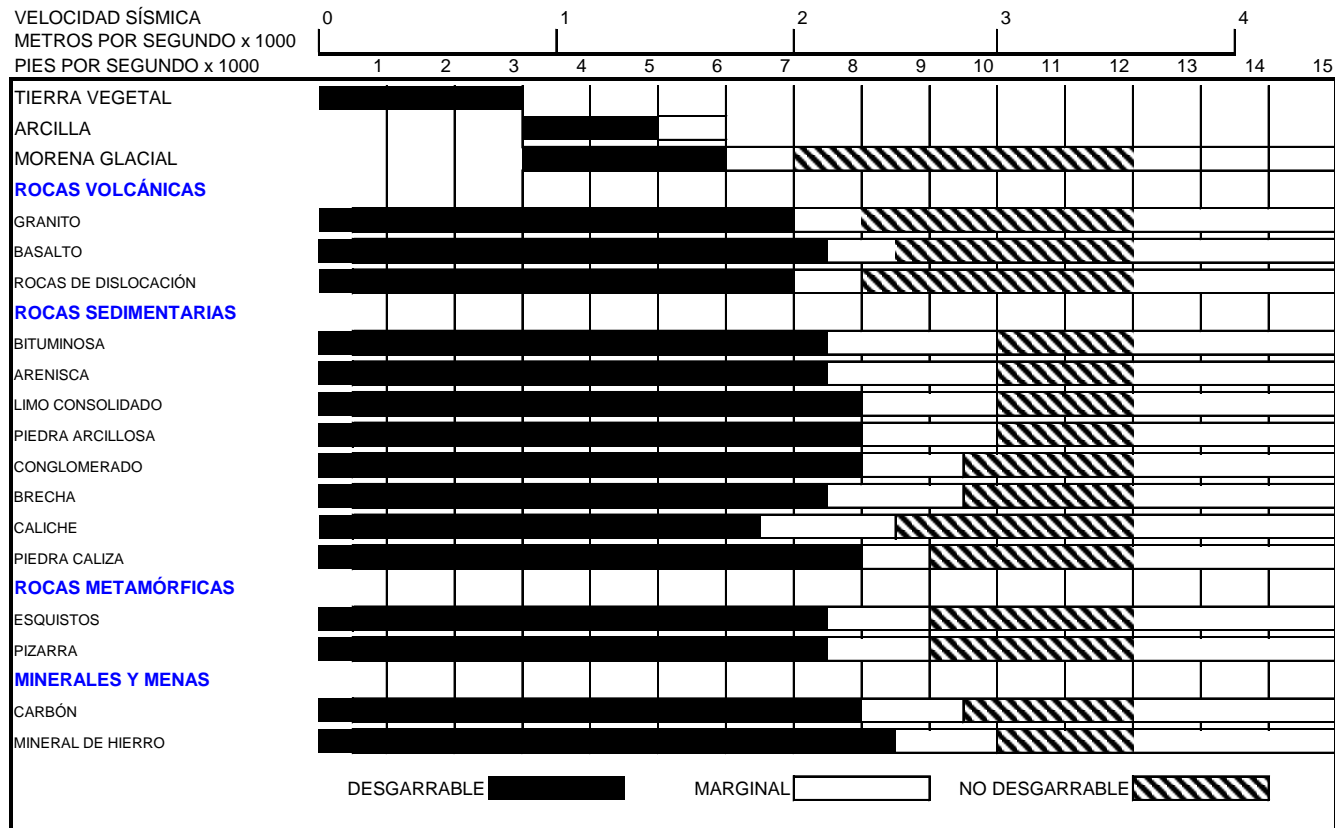


Tabla 1. Desgarrador D – 09 R.

**DESGARRADORES**

RENDIMIENTO DEL DESGARRADOR

- D-10 R

**D-10 R**

- DESGARRADOR No. 10 DE UN VÁSTAGO O DE VÁSTAGOS MÚLTIPLES
- ESTIMADO USANDO LAS VELOCIDADES DE LAS ONDAS SÍSMICAS

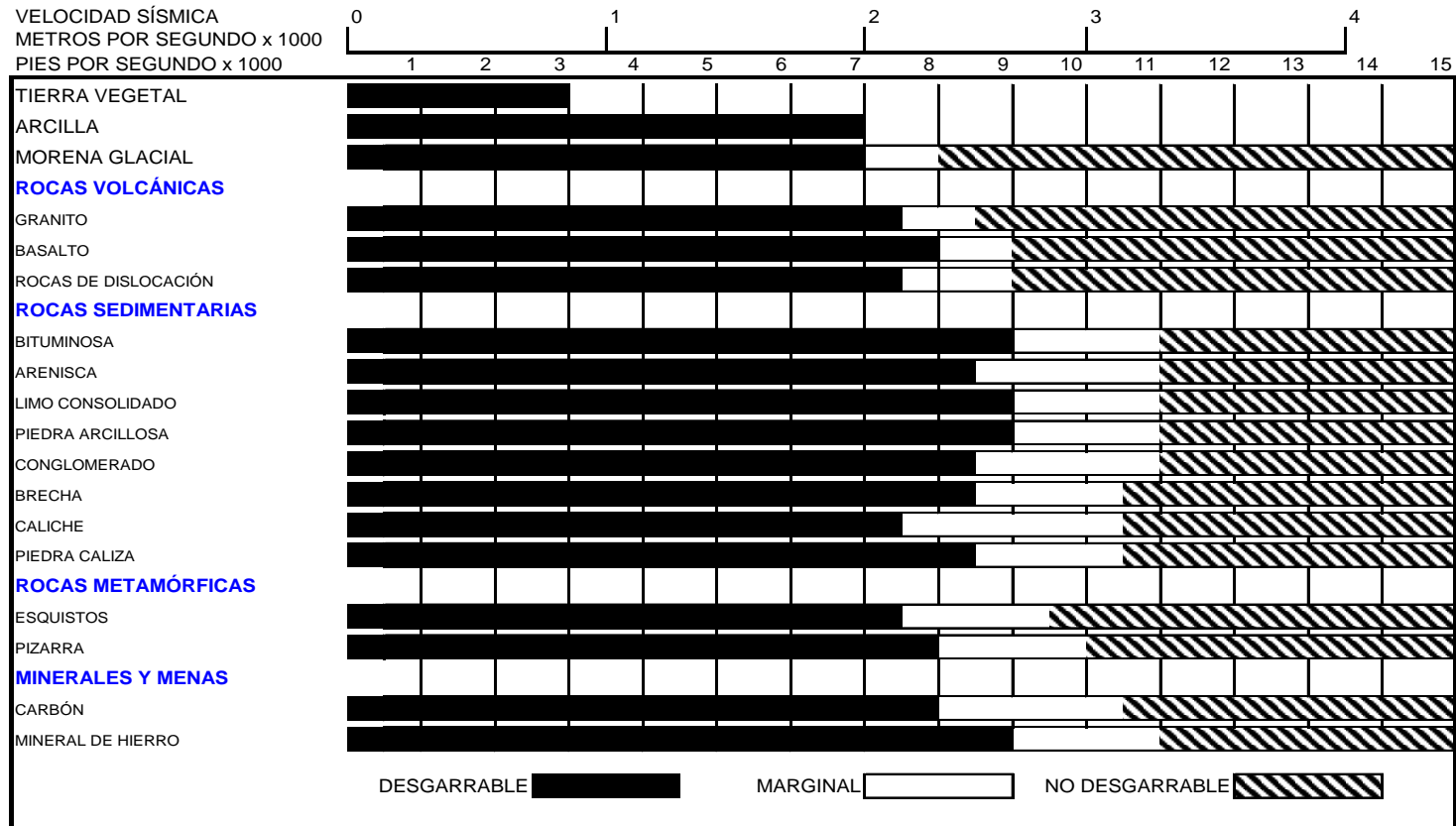


Tabla 2. Desgarrador D – 10-R.

**DESGARRADORES**

RENDIMIENTO DEL DESGARRADOR

- D-11 R

**D-11 R**

- DESGARRADOR No. 11 DE UN VÁSTAGO O DE VÁSTAGOS MÚLTIPLES
- ESTIMADO USANDO LAS VELOCIDADES DE LAS ONDAS SÍSMICAS

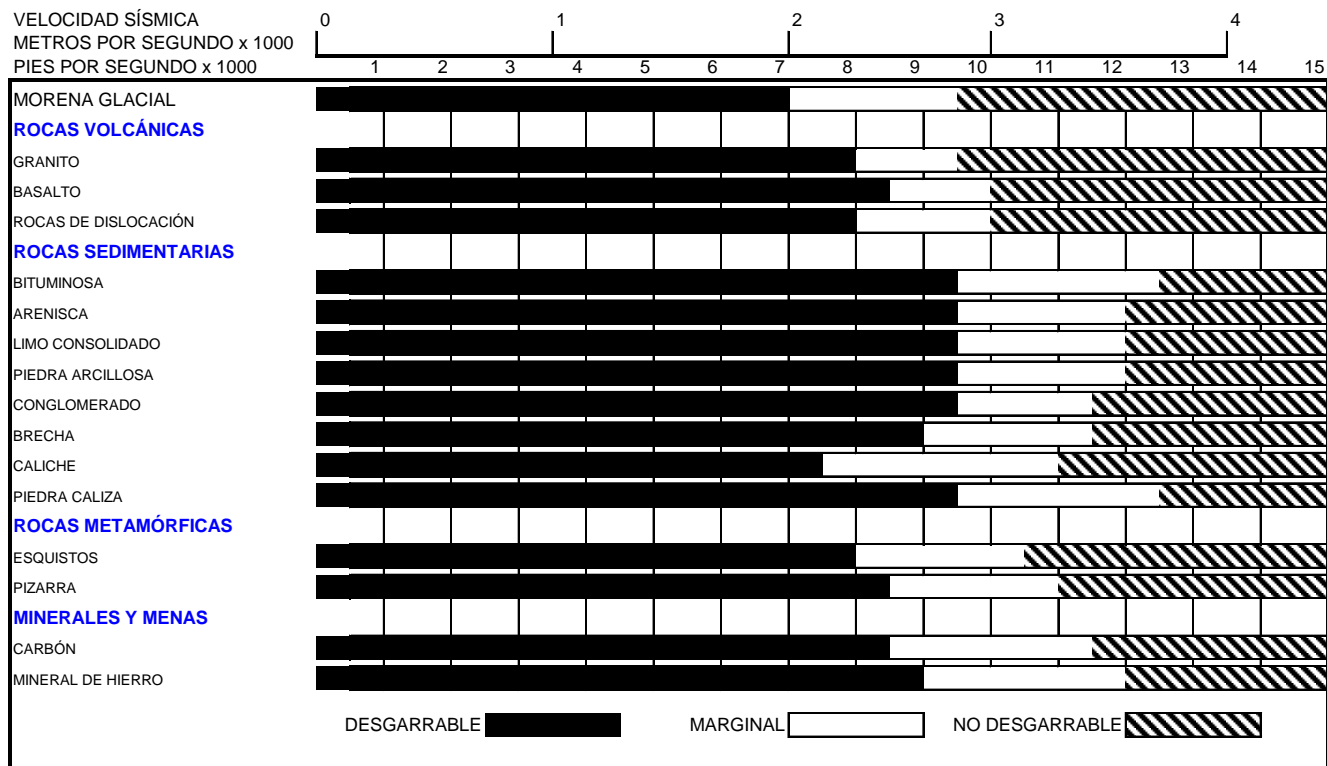


Tabla 3. Desgarrador D – 11 R.

**DESGARRADORES**

RENDIMIENTO DEL DESGARRADOR

- D-11 R CD

**D-11 R CD**

- DESGARRADOR No. 11 DE UN VÁSTAGO
- ESTIMADO USANDO LAS VELOCIDADES DE LAS ONDAS SÍSMICAS

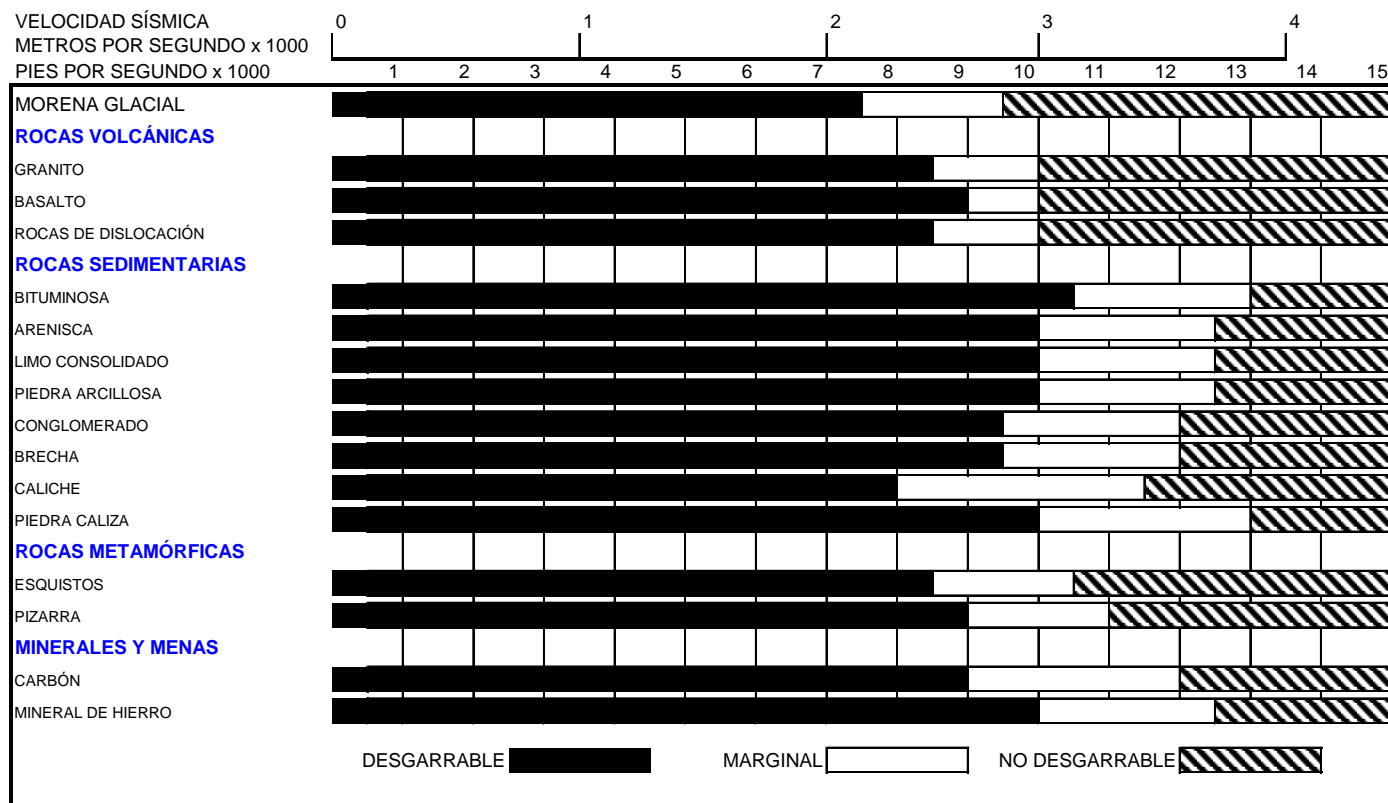


Tabla 4. Desgarrador D – 11 R - CD.



Como se puede apreciar, para los materiales de composición sedimentaria, caliches y rocas ígneas<sup>1</sup>, las velocidades longitudinales de propagación menores a 2400 m/s indican un estado suelto o poco consolidado que es factible remover con cualquiera de estos 3 tractores; mientras que para valores mayores a 3000 m/s se requiere necesariamente para su remoción del uso de explosivos.

En la zona de transición con velocidades longitudinales comprendidas en el intervalo de 2400 y 3000 m/s la consistencia de la roca no requiere el uso de explosivos para ser removida pero sí el empleo del gancho del tractor para abrir surcos en ella y aflojar el material, término que se denomina arabilidad, para posteriormente removerlo con el uso de la pala mecánica.

Los valores anteriores de velocidad longitudinal si bien no pueden ser aplicados directamente para determinar el grado de arabilidad del tipo de maquinaria utilizado actualmente para abrir las zanjas, sí puede tomarse como referencia para evaluar su rendimiento en los diferentes tramos por abrir.

Considerando que la potencia de la zapadora es menor a la de los tractores anteriormente comentados, resulta lógico suponer que en rocas ígneas con velocidades mayores a 3000 m/s el rendimiento de dicha máquina será nulo o muy pobre, mientras que en materiales con velocidades menores a 2400 m/s su rendimiento puede tener una eficiencia del 80 al 90% y disminuir en las zonas de transición a rendimientos del orden del 50%.

<sup>1</sup> Las rocas ígneas (del latín igneus) o magmáticas se forman a partir de la solidificación de un fundido silicatado o magma. La solidificación del magma y su consiguiente cristalización puede tener lugar en el interior de la corteza, tanto en zonas profundas como superficiales, o sobre la superficie exterior de ésta.

## 6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Reconocimiento Geológico

El Estudio Geológico del sitio se realizó en 2 etapas:

1. Consistió en una recopilación de información, la cual incluyó la revisión de información Geológica y Geohidrológica del área a partir de los trabajos de diversos investigadores de la Cuenca del Valle de México. Ver figura 4.
2. Consistió en un reconocimiento Geológico de campo y sus alrededores con objeto de establecer la estratigrafía del sitio y el modelo Geohidrológico del área. Ver figura 4.

Los materiales tobáceos, piroclásticos, dacíticos y basálticos que constituyen las faldas del Cerro del Chiquihuite y que se clasifican geotécnicamente como Zona I, presentan baja permeabilidad y por consiguiente no propician la infiltración del agua de lluvia, escurriendo mayoritariamente por sus laderas y constituyendo una zona de recarga de los acuíferos del lugar en las partes situadas topográficamente más bajas. Ver figura 36.

A poca profundidad es factible encontrar estos materiales piroclásticos con buenas posibilidades acuíferas, así como roca volcánica fracturada la cual constituye el basamento local del sitio. (figura 34)

El reconocimiento Geológico a todo lo largo del tramo de estudio permitió precisar los contactos Geológicos entre las diferentes unidades, determinar su litología, estado de fracturamiento y grado de dureza, características de las rocas ígneas extrusivas que conforman la totalidad del tramo en cuestión, las cuales como se sabe pertenecen a la Provincia Fisiográfica del Eje Neovolcánico presentando edades del Terciario y Cuaternario.

Superficialmente se presenta un paquete de suelos residuales, depósitos de talud y/o materiales de relleno con espesor reducido de algunos centímetros y máximo de 2 m en estado medianamente compacto a compacto, como lo indican sus bajas velocidades de propagación.

Subyaciendo a los suelos, depósitos de talud y/o materiales de relleno, se presenta un paquete de roca descomprimida o intemperizada, poco fracturada con espesor variable y de baja permeabilidad, de regular a buena calidad.

Por último, subyaciendo a los anteriores a partir de los 6 a 14 m de profundidad, se presenta una roca intacta poco permeable de buena a muy buena calidad con espesor promedio de 30 m y altas velocidades de propagación.

De acuerdo con lo anterior y revisando la fotografía aérea de 2008, como se muestra en la figura 39, encontramos que los 4 escarpes presentan una geomorfología estable, con las mismas bajadas de agua que delimitan las columnas de roca aparentemente inestables y sin evidencias de desprendimientos de grandes bloques; situación obviamente favorable para la estabilidad del proyecto en cuestión, debido a que la interpretación Geológica de esta fotografía indica que la transformación del macizo se realiza lentamente a través de cambios graduales por su alta calidad de roca, en donde los principales agentes erosivos solo ocasionan modificaciones leves del relieve.

El sitio en estudio con sus 4 crestones se puede caracterizar en función de sus pendientes a partir de los siguientes dominios geotécnicos:

- a) Aquellos con pendientes suaves, con inclinaciones comprendidas en el intervalo de 2 a 25°, que corresponden con las zonas topográficamente más bajas y mesetas entre los escarpes, aprovechadas para el tránsito de vehículos en las actuales avenidas. Obviamente son estables y constituyen aproximadamente el 94% de la zona estudiada.
- b) Aquellos con pendientes comprendidas entre 25 y 70° de inclinación, que corresponden con zonas de roca intemperizada, poco alterada, con escarpes poco pronunciados a muy pronunciados en los cuales por lo general aflora la roca, aunque es difícil percibirlo actualmente debido al desarrollo inmobiliario de la zona, el cual permite únicamente la inspección de los escarpes más pronunciados. Estas franjas del terreno abarcan aproximadamente el 6% del sitio estudiado. Obviamente, en este dominio se ubican los escarpes o salientes de roca que constituyen los crestones aparentemente inestables que propician el desprendimiento de pequeños bloques y graneos. Estos desprendimientos continuos forman pequeños depósitos de talud situados al pie de los escarpes. (figuras 35, 37 y 38).

Por lo anterior se puede asegurar que en los escarpes no hay grandes bloques inestables que amenacen con deslizarse a través de sistemas de cuñas, sino pequeños fragmentos resultantes por el intemperismo que producen los agentes erosivos constantemente actuantes ( agua y viento principalmente ), en las rocas Terciarias descubiertas, no en las urbanizadas y protegidas por las mismas construcciones; los cuales se manifiestan a través de discontinuidades verticales y pequeñas socavaciones que no repercuten significativamente en la estabilidad de los crestones de roca.

Los vectores de salida son relativamente pocos en comparación con la totalidad de los planos de intersección entre las diferentes familias de discontinuidades, lo que conduce en una primera instancia a asegurar que los 2 escarpes estudiados prácticamente son estables y solo habría que cuidar el desprendimiento de los pequeños fragmentos producidos por el fuerte intemperismo retirándolos en caso de encontrarse en estado suelto o bien embebiéndolos en mampostería a fin de evitar su deterioro progresivo.

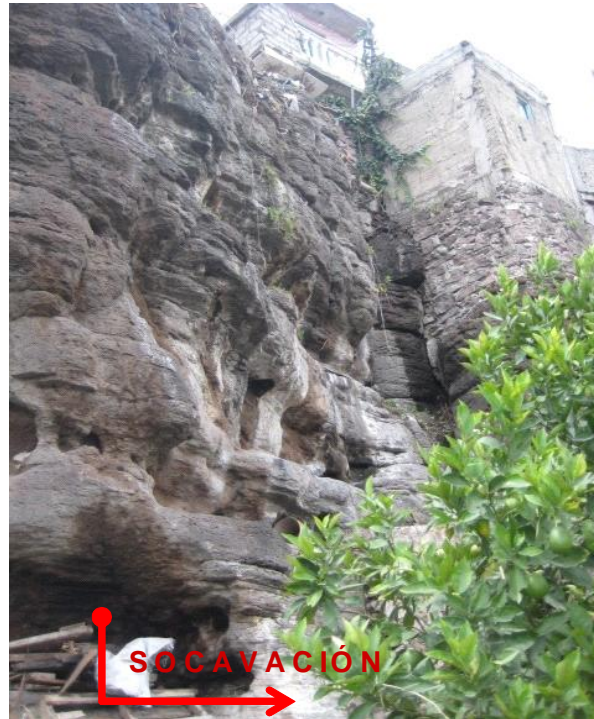


Figura 34. Manzana 15 – Lote 34.

Aspecto general de la roca expuesta en el escarpe. Nótese la socavación que han producido los lugareños, la cual es necesaria sustituir con mampostería a fin de devolverle al macizo su calidad de roca y contribución original.





Figura 35. Manzana 15 – Lote 33.

Sobre el escarpe que limita la parte trasera del predio, se han construido diferentes estructuras. En la porción derecha de la fotografía se observa que la roca fue recubierta y sobre ella se construyó una especie de balcón apuntalado que sobresale del macizo.



Figura 36. Manzana 16 – Lote 22.  
Afloramiento del contacto entre las dacitas (porción superior) y las tobas (porción inferior), ambas de buena calidad.



Figura 37. Manzana 16 – Lote 22.

Detalle del escarpe que limita al predio. Un gran bloque de roca de forma columnar se diferencia del macizo, se observan esquinas y bordes sin soporte que posiblemente puedan desprenderse del escarpe si no son rellenadas con mampostería.



Figura 38. Manzana 16 – Lote 8.  
Estructura construida sobre dos cuerpos de roca. Pese a sus discontinuidades y pequeños huecos observados, la roca es estable y con alta resistencia mecánica.

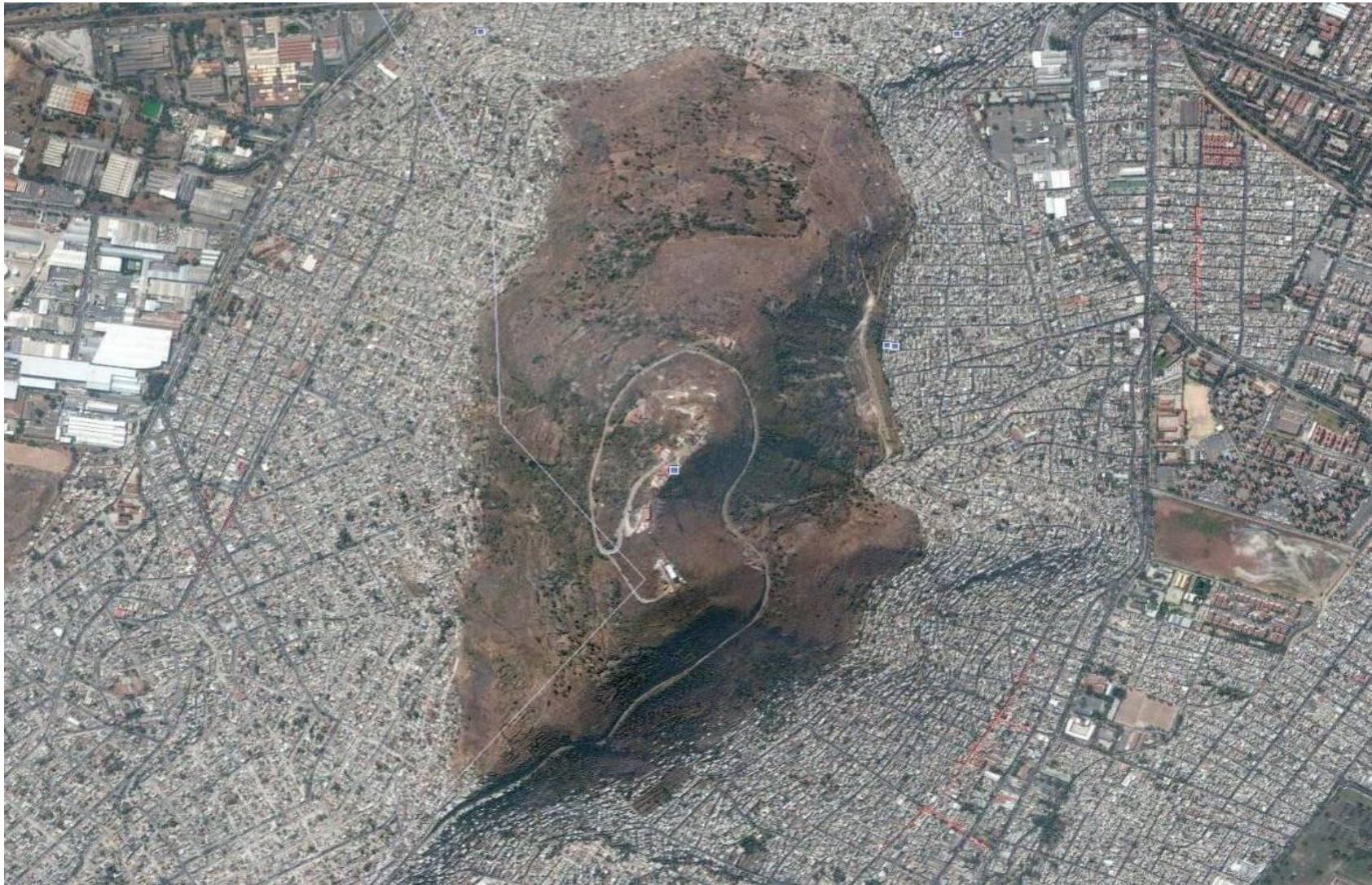


Figura 39.- Fotografía Aérea del Sitio 2008

## 6.2. Ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

A partir del procesado e integración de información de los 8 SEV realizados, fue posible construir los 3 perfiles geoeléctricos que correlacionan los resultados de estos 8 SEV y seccionan de manera perimetral la zona en estudio para caracterizarla completamente. (Figura 40).

La integración de los resultados del reconocimiento Geológico y prospección geofísica permitieron determinar la distribución de los paquetes litológicos a partir de la elaboración de los perfiles o cortes electro-estratigráficos del subsuelo, los cuales de manera indirecta muestran la columna estratigráfica determinada mediante el proceso realizado con *RESIXP* y *WINGLINK* mediante la correlación de los valores de resistividad para los 8 SEV.

Con esta técnica se alcanzaron profundidades aproximadas de investigación de 150 m, lo cual permitió detallar en los paquetes que se encuentran en los primeros 100 m de profundidad; esto es: explorar en el complejo volcánico superficial y en el basamento permeable conformado posiblemente por andesitas del Terciario Superior.

Dos son los paquetes o cuerpos de roca principales interpretados en los cortes o perfiles electro-estratigráficos que se muestran en las figuras y se describen a continuación:

- a) En la parte superior y con espesor de 30 a 50 m se presenta el primer paquete constituido por dacitas alternadas con tobas de composición fundamentalmente arenosa, como lo indican sus resistividades de 7 a 61 Ohm-m (color verde) (figuras 41 a 51), distribuido uniformemente con espesores menores en las partes altas que engrosan gradualmente hacia las partes topográficamente más bajas, en los cuales predominan los materiales poco permeables.

Es importante recalcar la regularidad estratigráfica de este primer paquete, puesto que su distribución es uniforme y por consiguiente se puede asegurar que el basamento en el cual descansa no se encuentra afallado o dislocado, por lo que se descarta la existencia de fallas regionales en el subsuelo profundo que pudieran repercutir en posibles asentamientos diferenciales por efecto de los fenómenos de subsidencia, es decir, que se pudieran acomodar por el cambio en el estado de esfuerzos que produce el abatimiento de los niveles freáticos.

- b) Le subyace un importante paquete de espesor indefinido y resistividades altas a intermedias comprendidas en el intervalo de 40 a 243 Ohm-m (colores verde, amarillo, naranja y rojo) (figuras 41 a 51), que posiblemente correspondan con andesitas y tobas de mediana a alta permeabilidad que constituyen el basamento Geológico del sitio con buenas posibilidades acuíferas, ya que, cabe hacer notar que aproximadamente a la elevación 2140 msnm, esto es entre 150 y 200 m de profundidad, se observa en todos los SEV un decaimiento de los valores de resistividad que pudiera corresponder con la presencia del nivel de aguas freáticas.

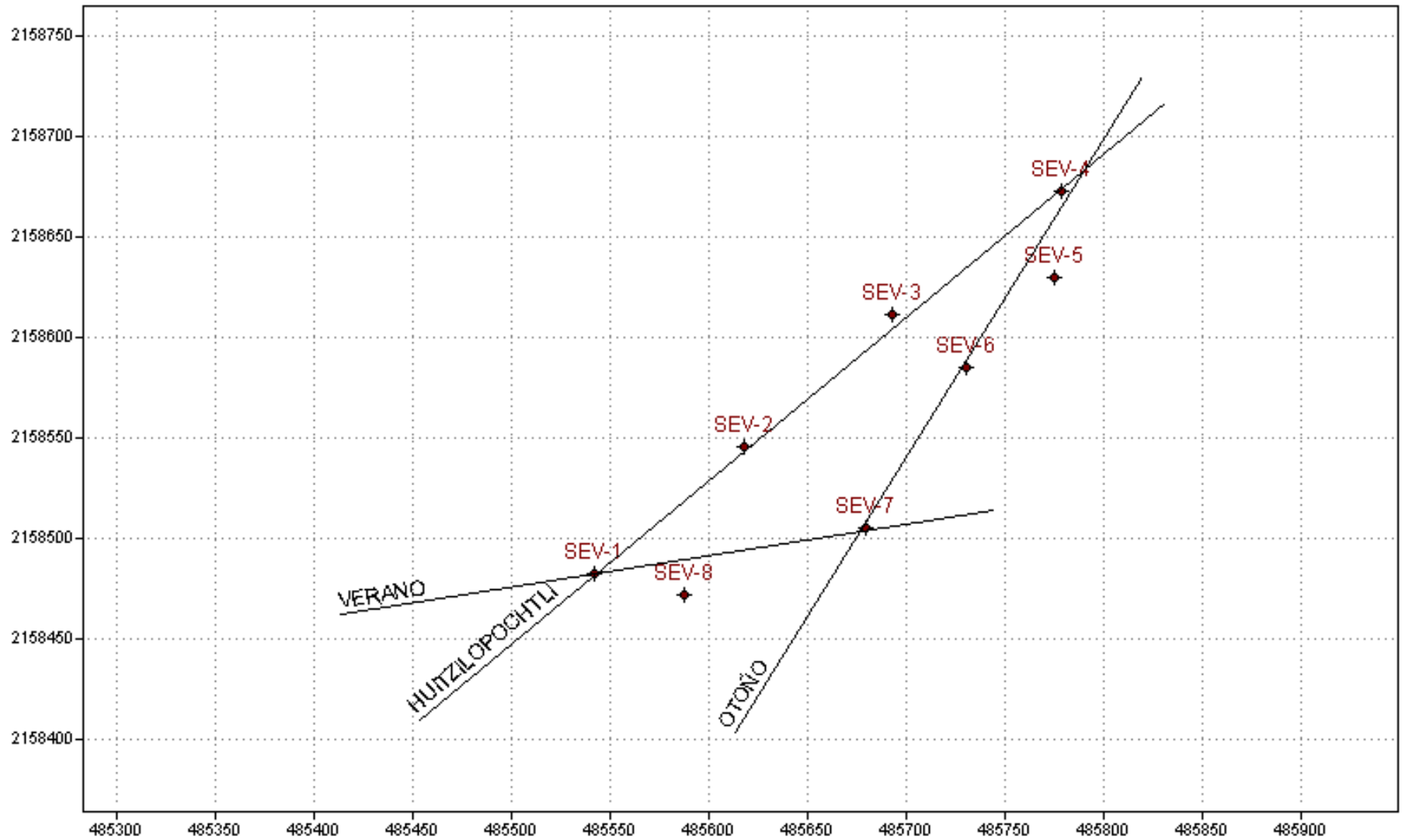


Figura 40. Localización de los SEV

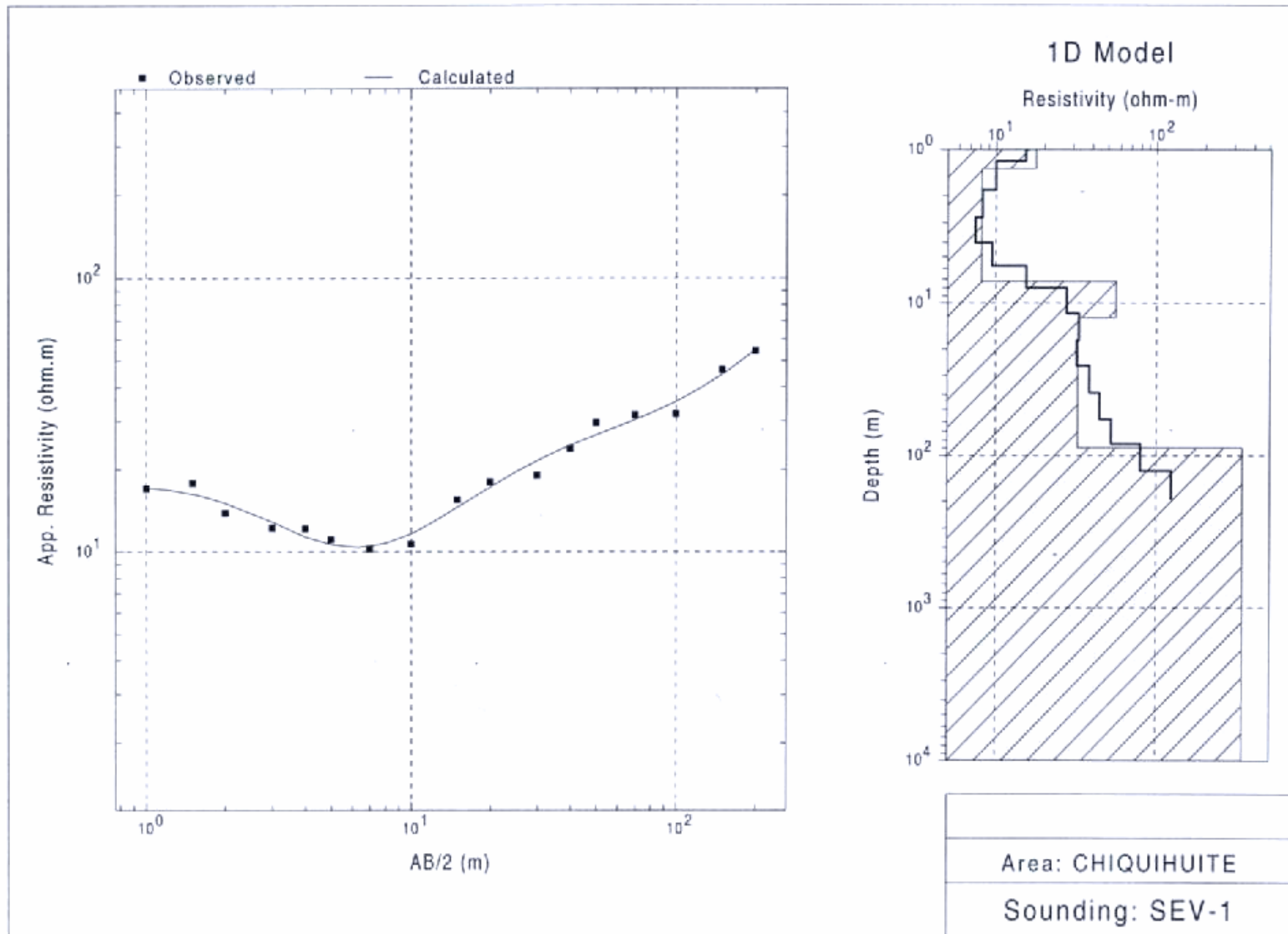


Figura 41. SEV -1



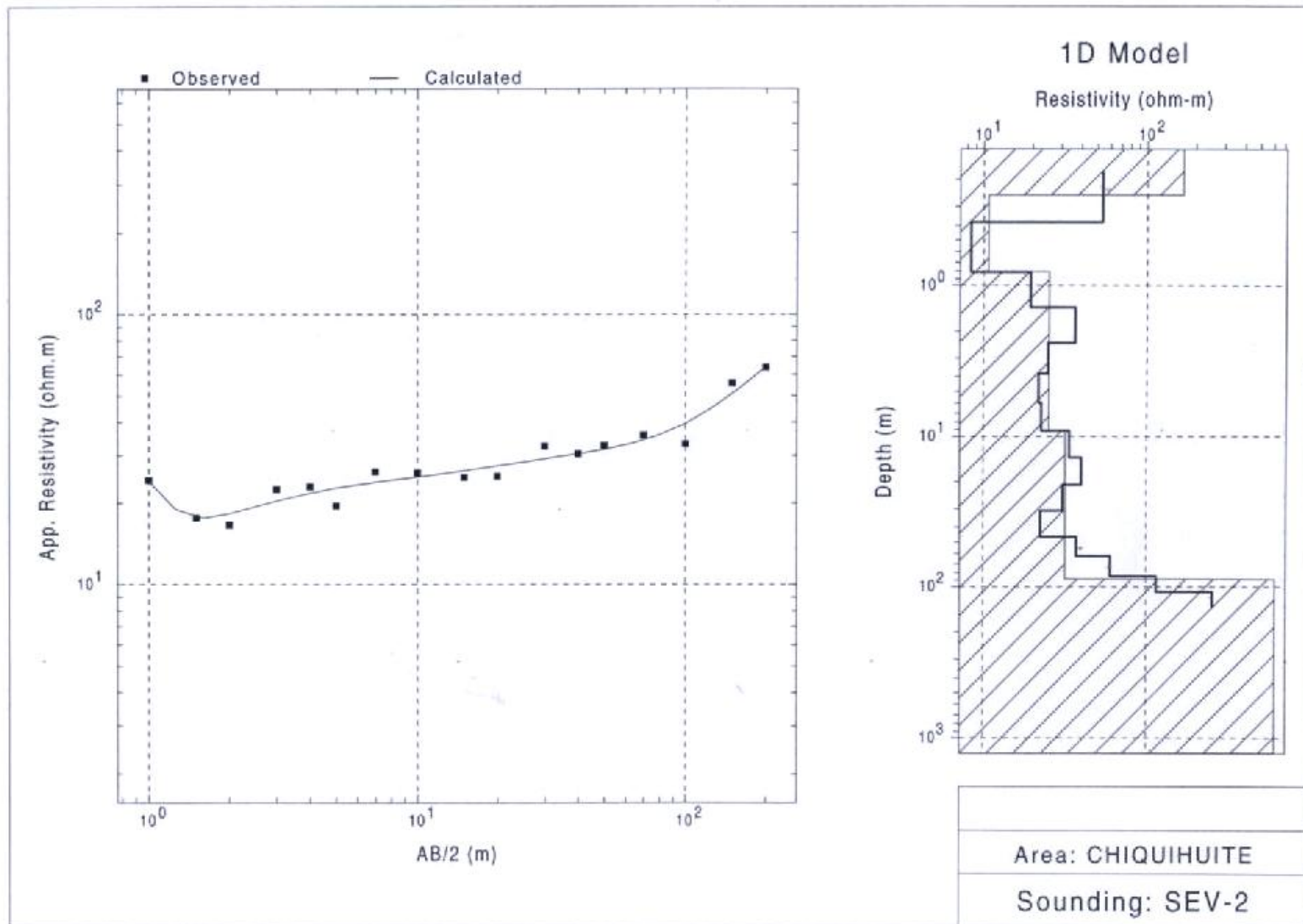


Figura 42. SEV -2

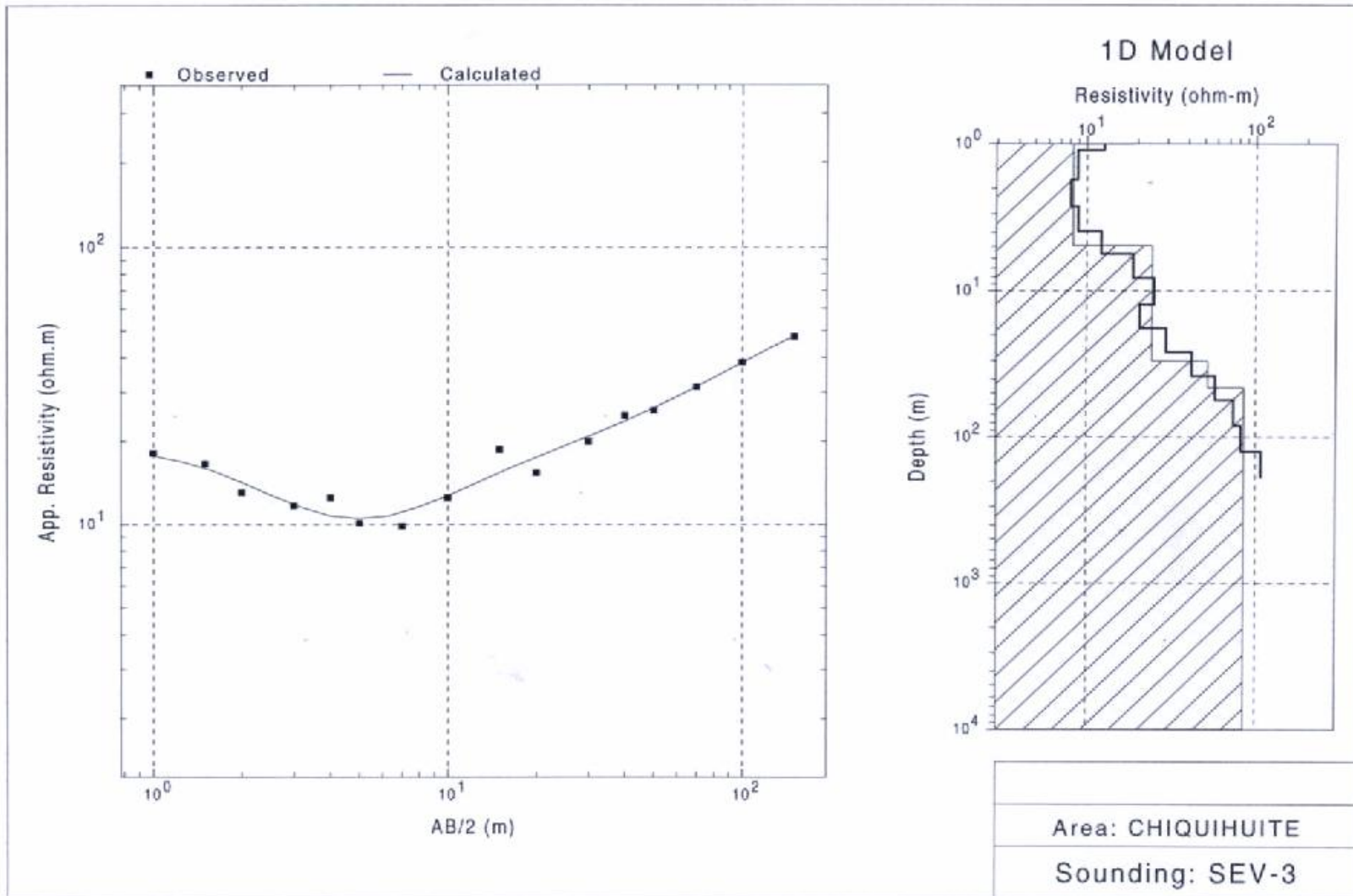


Figura 43. SEV- 3

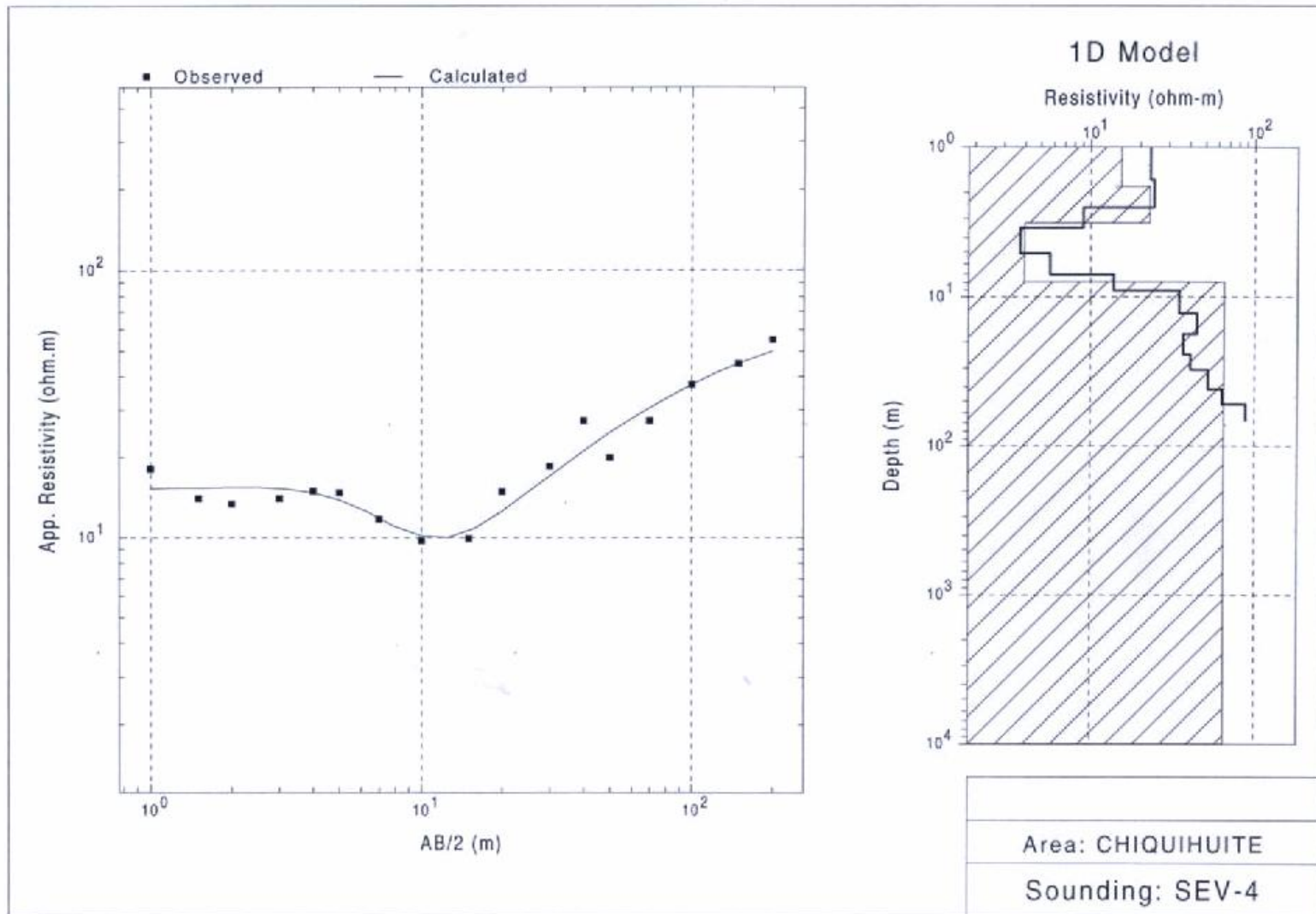


Figura 44. SEV - 4

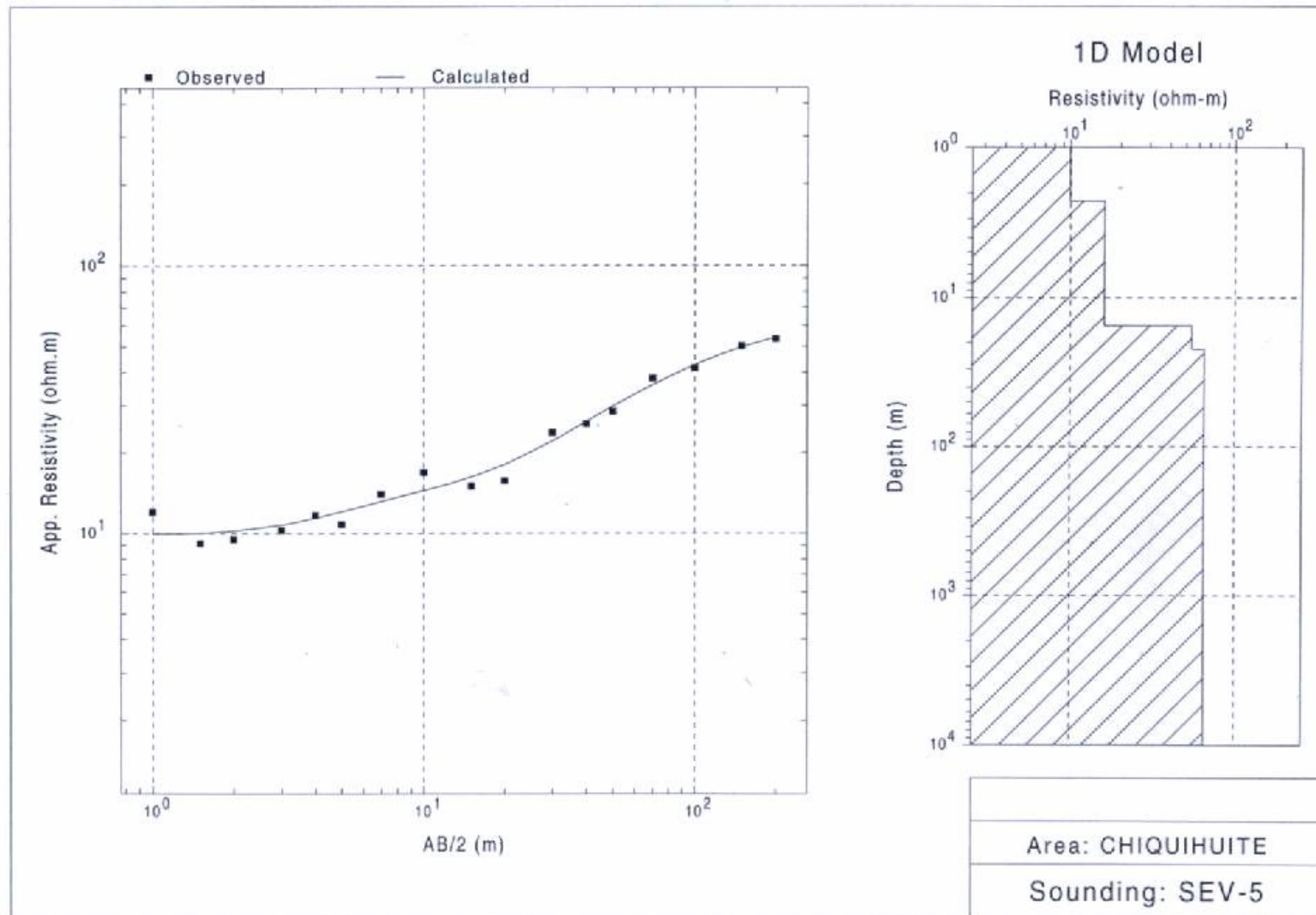


Figura 45. SEV - 5

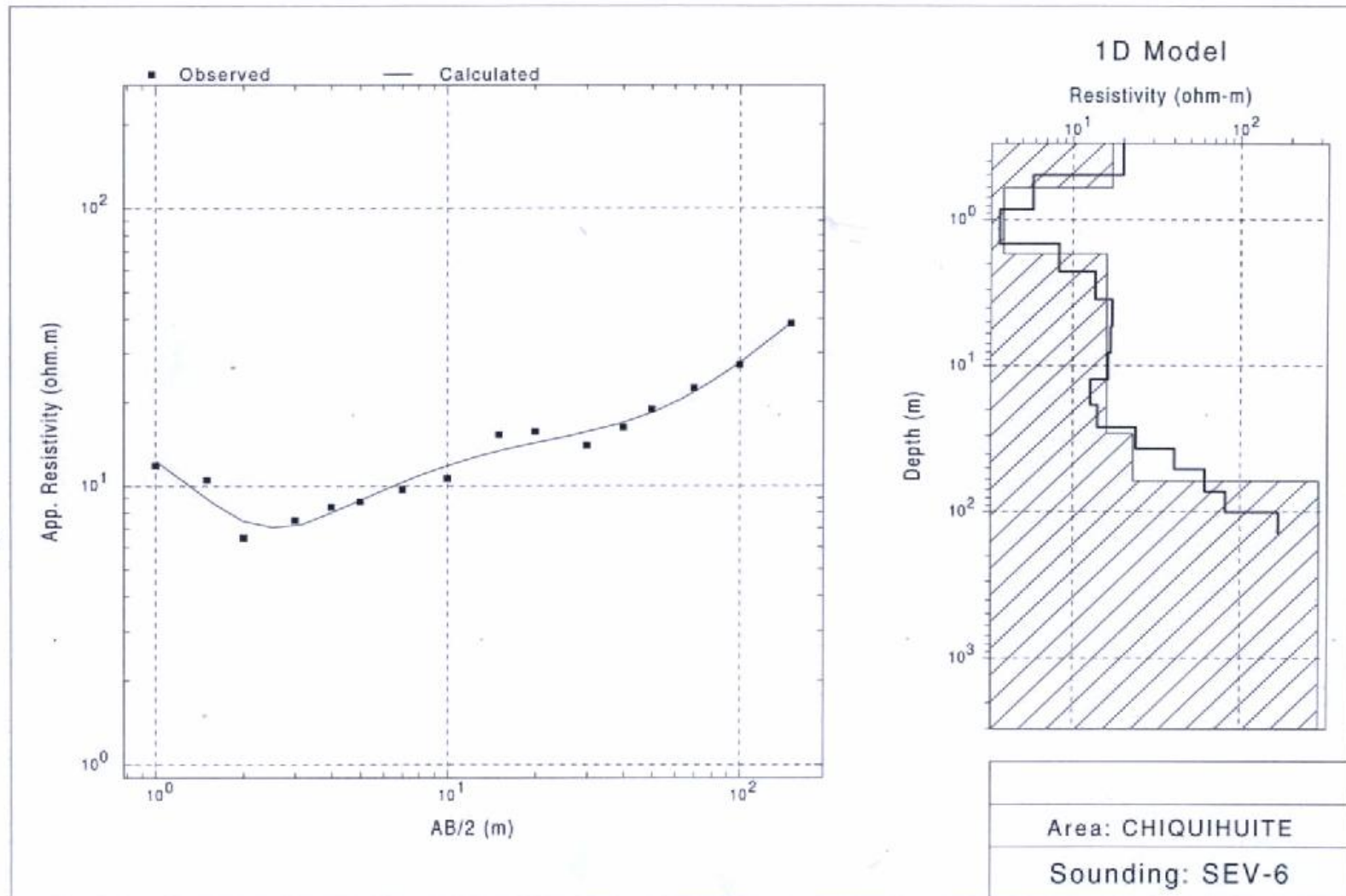


Figura 46. SEV - 6

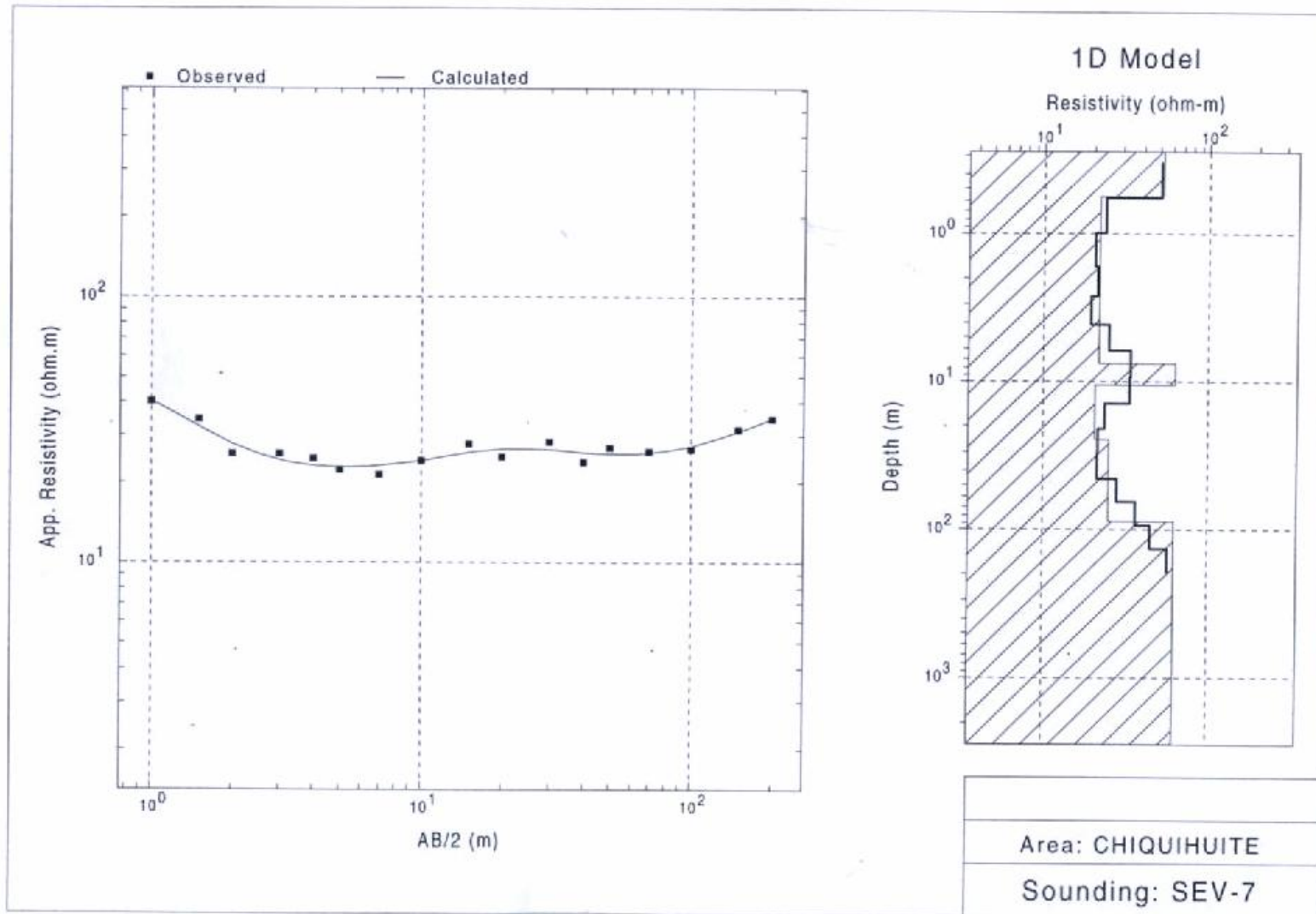


Figura 47. SEV - 7

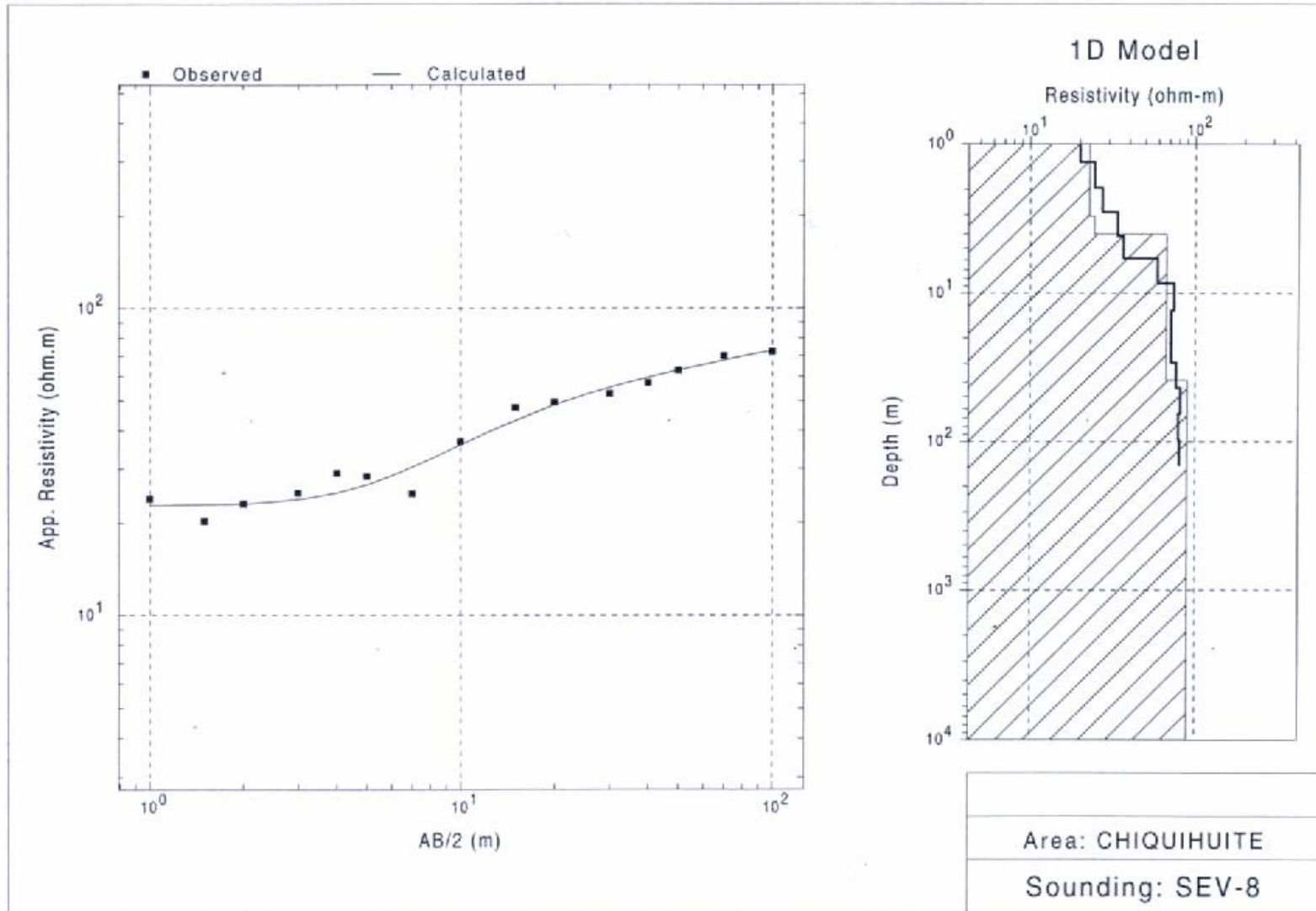


Figura 48. SEV - 8

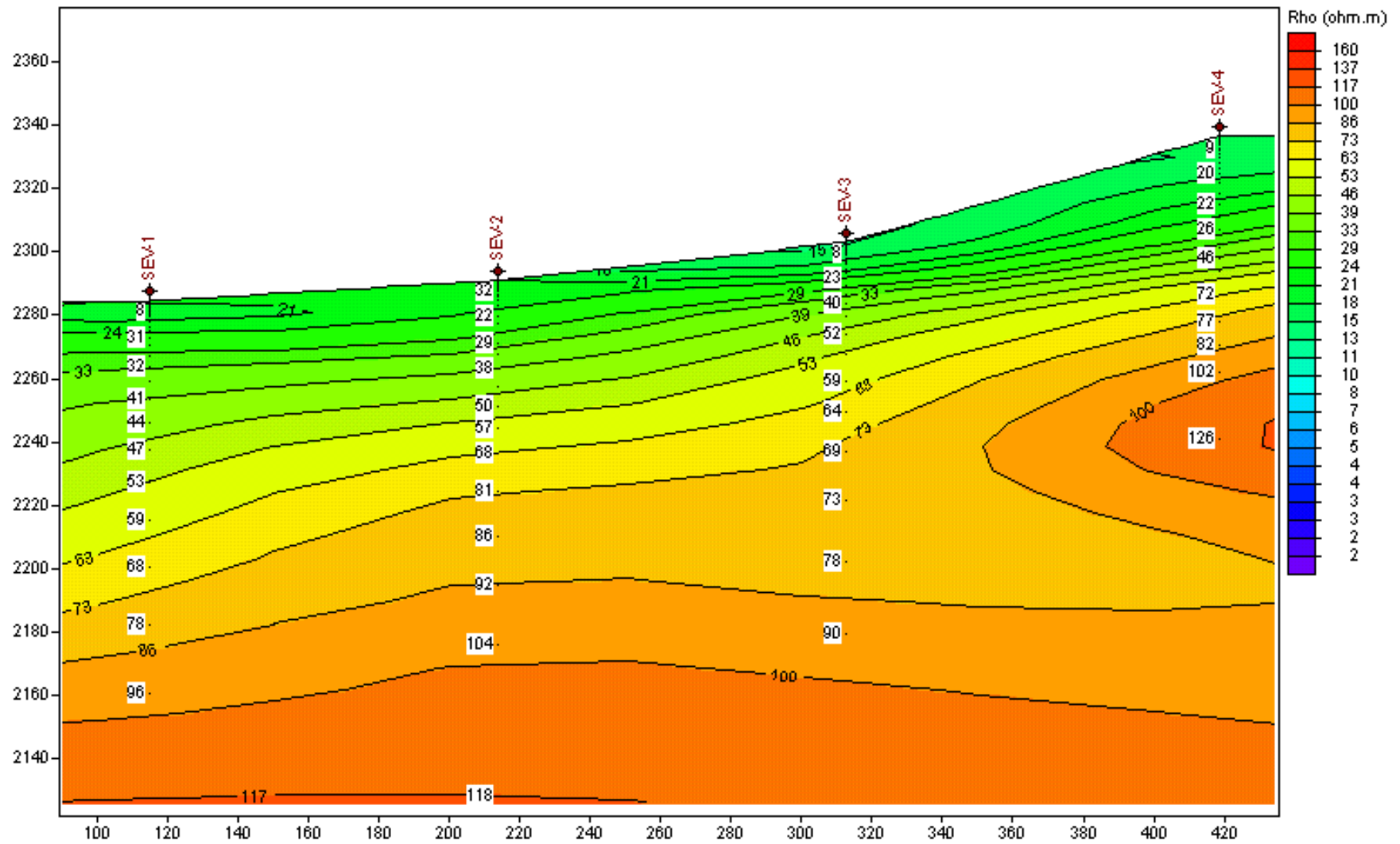


Figura 49. Perfil Geoeléctrico para la avenida Huitzilpochtli



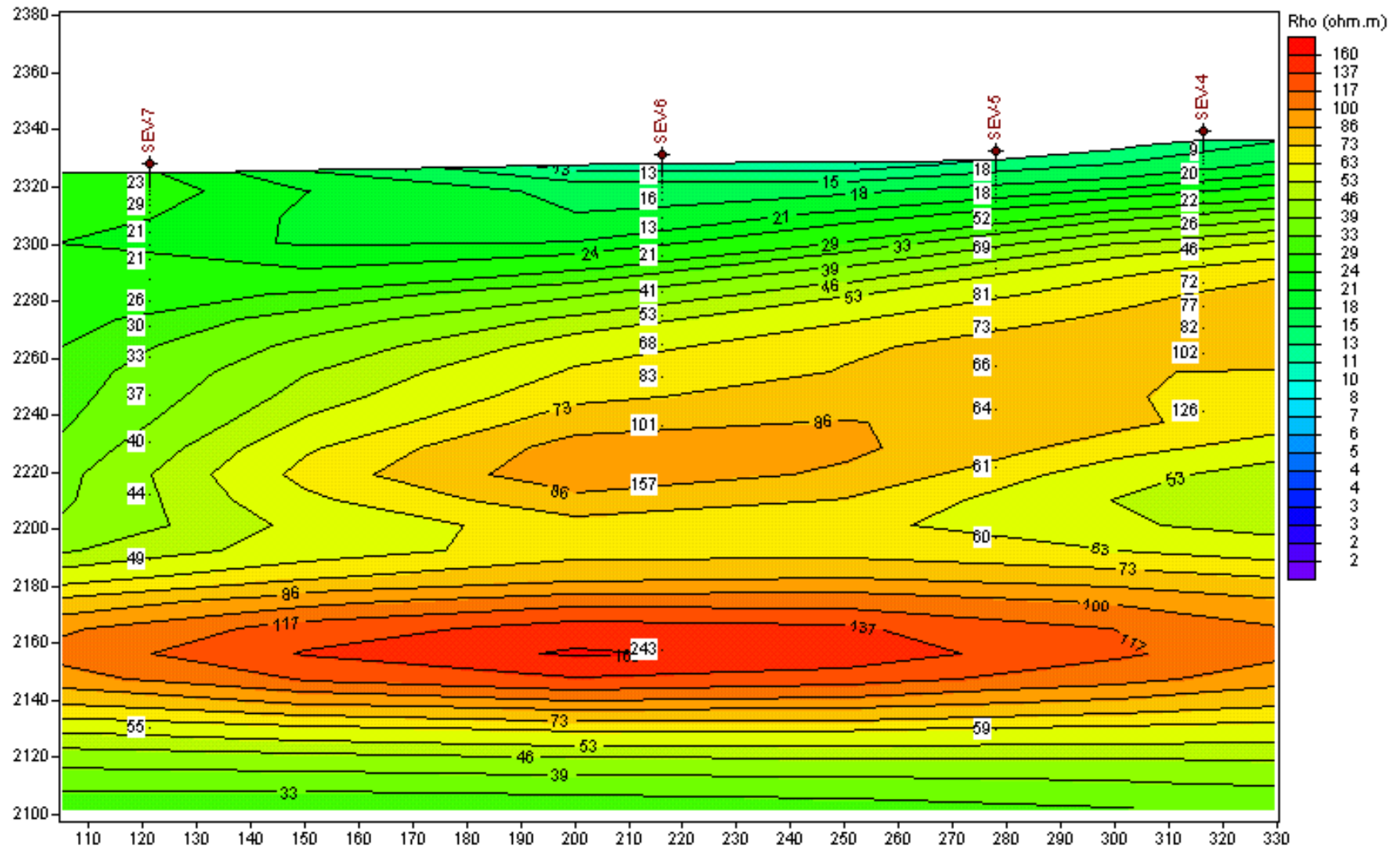


Figura 50. Perfil Geoeléctrico para la avenida Otoño

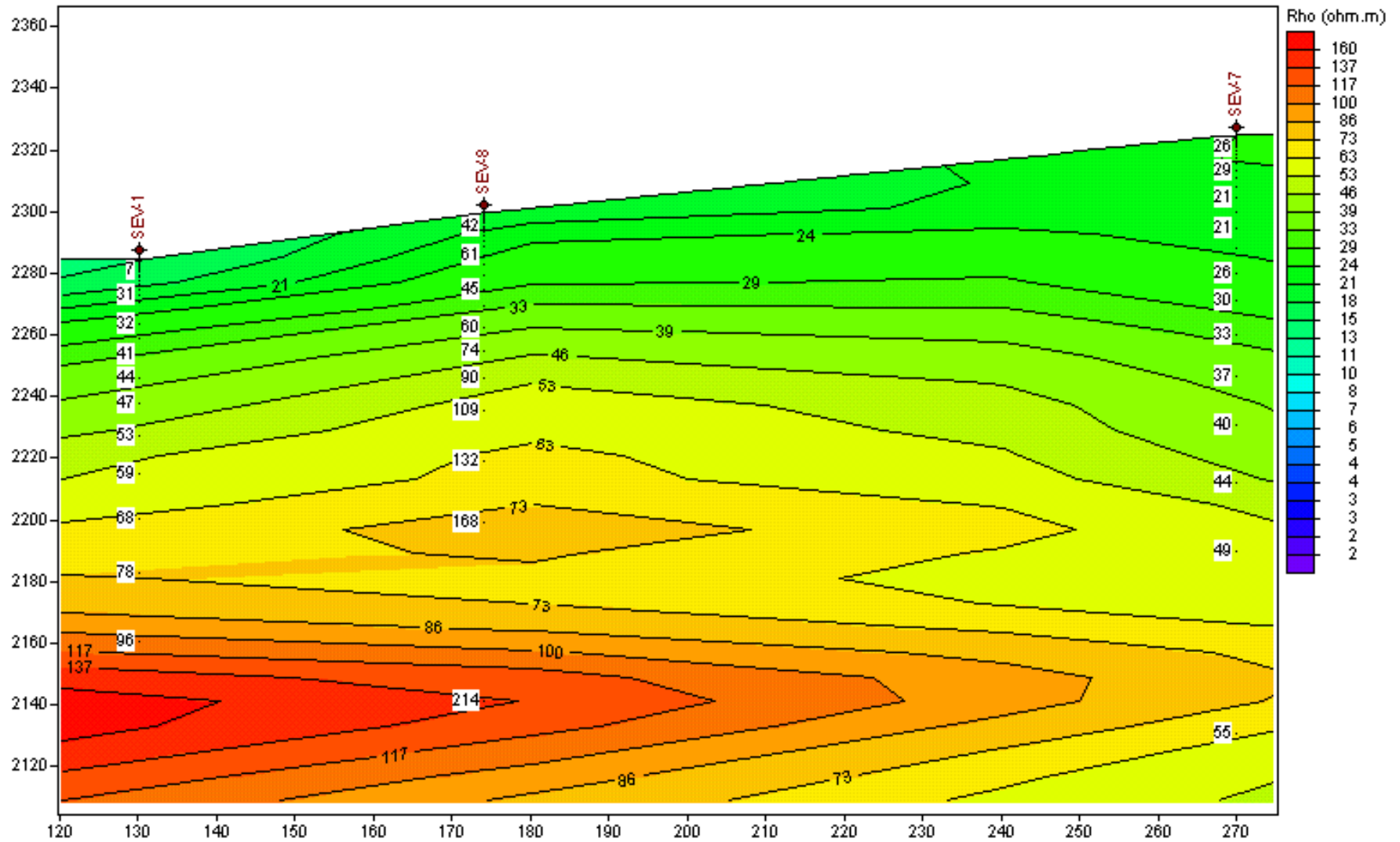


Figura 51. Perfil Geoeléctrico para la avenida Verano

### 6.3. Ejecución de Tendidos de Refracción Sísmica (TRS)

En este apartado, se muestran las secciones geosísmicas en velocidad longitudinal "P" correspondientes a los 7 TRS distribuidos perimetralmente en la zona de estudio (figuras 52 a 58), y también se muestran las secciones geosísmicas correspondientes en velocidad transversal "S" (figuras 59 a 65).

De acuerdo con los rasgos geomorfológicos y tipo de materiales presentes en el sitio estudiado, se corroboró que las 2 zonas escarpadas embebidas por las Manzanas 15 y 16, presentan una buena calidad de roca con pendientes y alturas de talud que propician la inestabilidad de fragmentos pequeños, pero no de grandes bloques, como se justifica a continuación:

Los espesores de los suelos residuales y depósitos de talud que constituyen los materiales de cobertura varían de 1.5 a 2.0 m, con velocidades longitudinales de 1270 a 2000 m/s y transversales de 340 a 690 m/s, indicativas de materiales de mediana calidad que resultan removibles con cualquier tipo de maquinaria, obteniendo rendimientos variables, según sea el caso, del 35 al 70%.

Por debajo de la costra superficial se detecta un importante paquete constituido por una mezcla o alternancia de dacitas y tobas medianamente fracturadas e intemperizadas que constituyen la zona relajada o descomprimida del macizo rocoso. Este paquete denominado zona descomprimida es muy importante debido a que representa el estado de los escarpes.

Sus velocidades de propagación longitudinal varían de 2490 a 3150 m/s y sus velocidades transversales de 900 a 1260 m/s, valores que determinan una buena calidad de roca, por lo que seguramente los taludes de los crestones o escarpes se mantendrán estables, aunque no se descarta el requerir algún tipo de tratamiento para soportarlos y minimizar su riesgo potencial, por lo que deberá de asegurarse el rellenar las diversas socavaciones realizadas por los lugareños a fin de ganar espacios con mampostería; sellar las grietas con gravas, tezontles y concretos pobres; calafatear las fracturas y drenar el agua almacenada a través de barrenos colocados en la base de los mismos de ser factible la movilización de un equipo pesado. El espesor de este paquete varía de 5 a 12.50 m como resultado de la degradación que ha producido al paso de miles de años los agentes erosivos y ambientales en el macizo rocoso.

Por último, a partir de los 6.5 a 14.0 m de profundidad y constituyendo la roca basal del proyecto con espesor indefinido, se presenta la roca intacta constituida por dacitas con diferentes grados de fracturamiento y en ocasiones con tobas intercaladas, como lo indican sus velocidades longitudinales de 3300 a 4060 m/s y velocidades transversales de 1360 a 1780 m/s, la cual desde el punto de vista mecánico corresponde con una roca muy compacta y poco fracturada que resulta no arable, por lo que requeriría en un caso hipotético forzosamente del uso de explosivos para su fragmentación y posterior remoción.

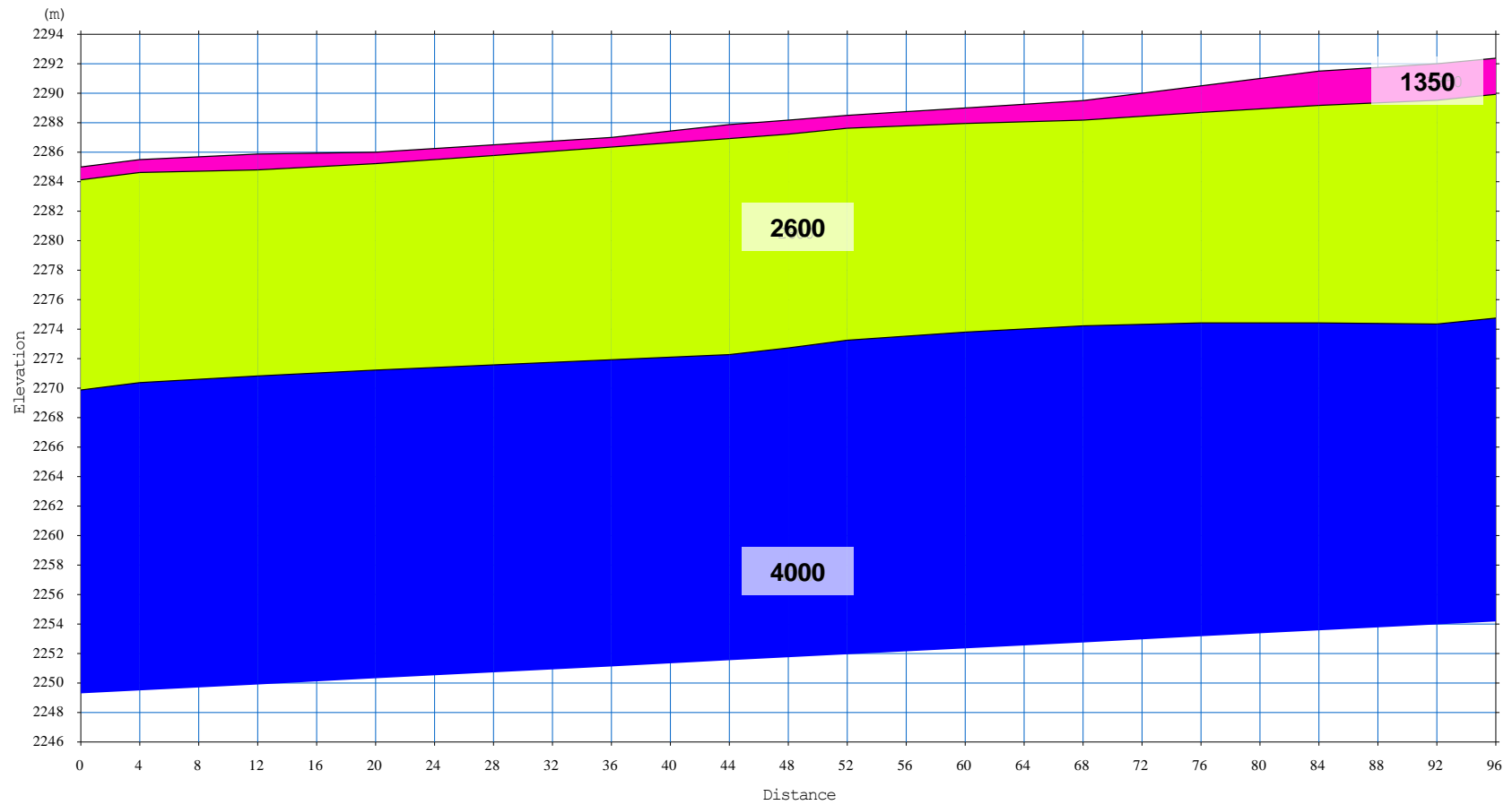


Figura 52. Perfil Geosísmico 1 en velocidad de onda longitudinal VP

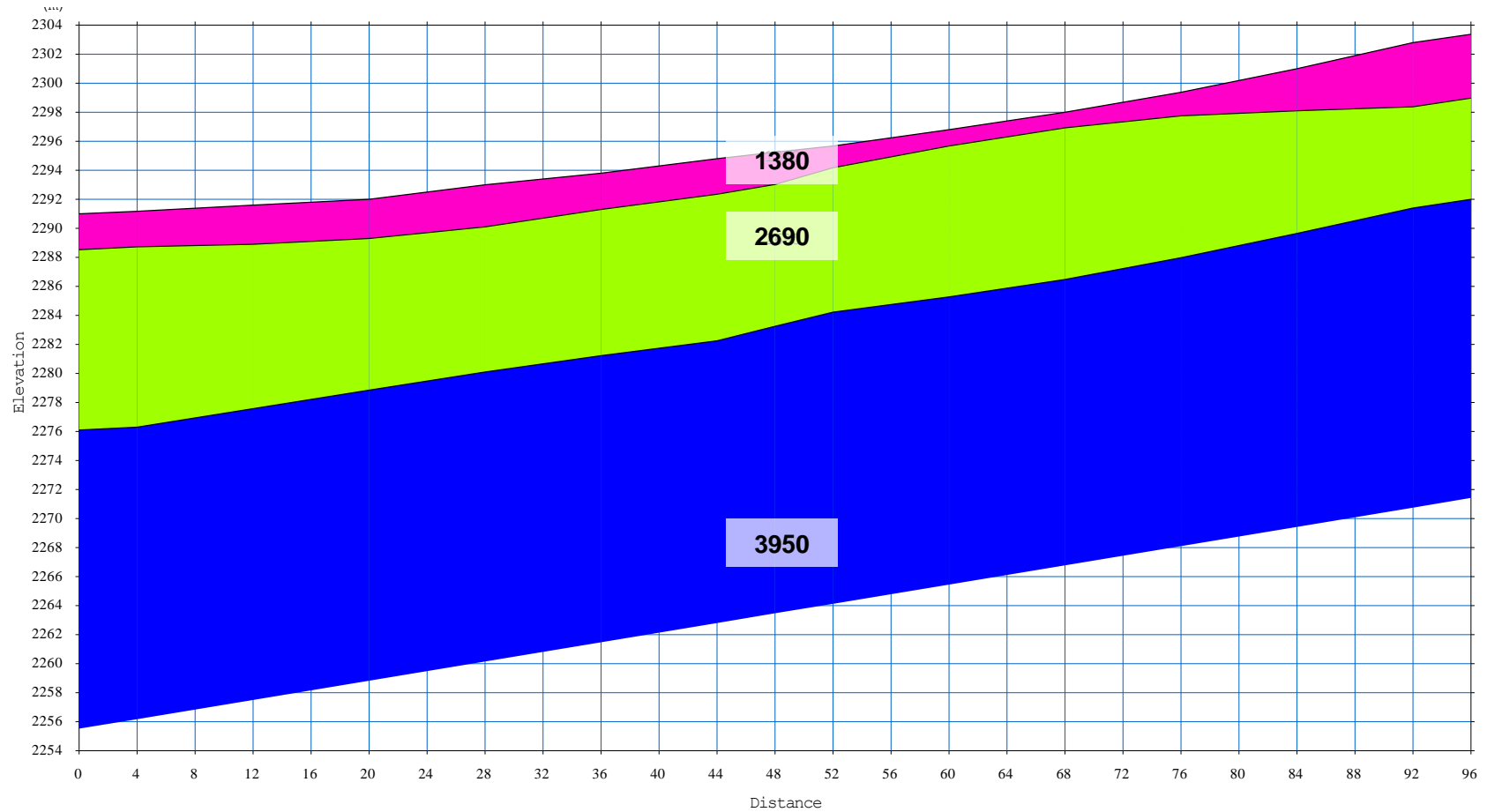


Figura 53. Perfil Geosísmico 2 en velocidad de onda longitudinal VP

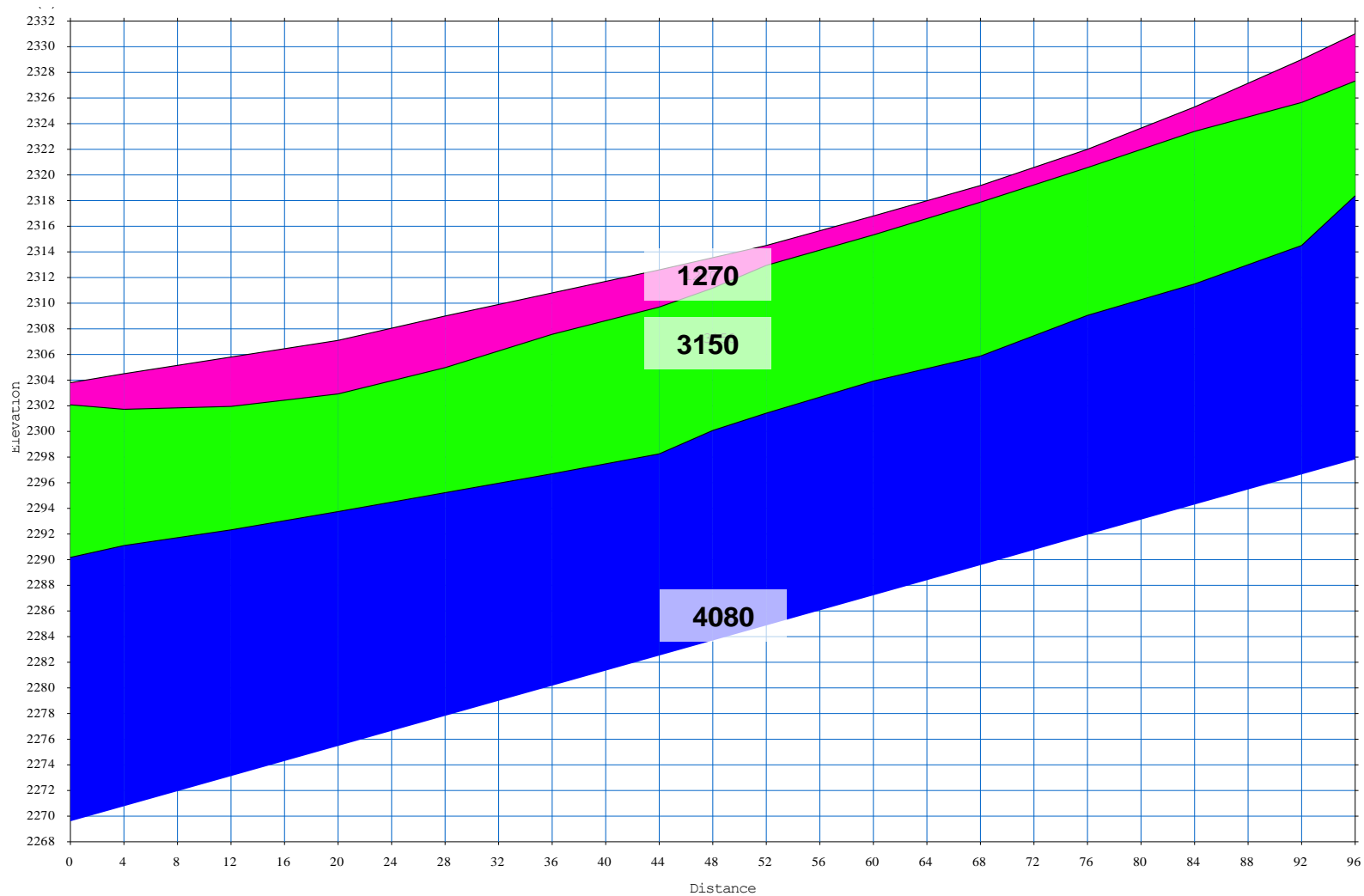


Figura 54. Perfil Geosísmico 3 en velocidad de onda longitudinal VP

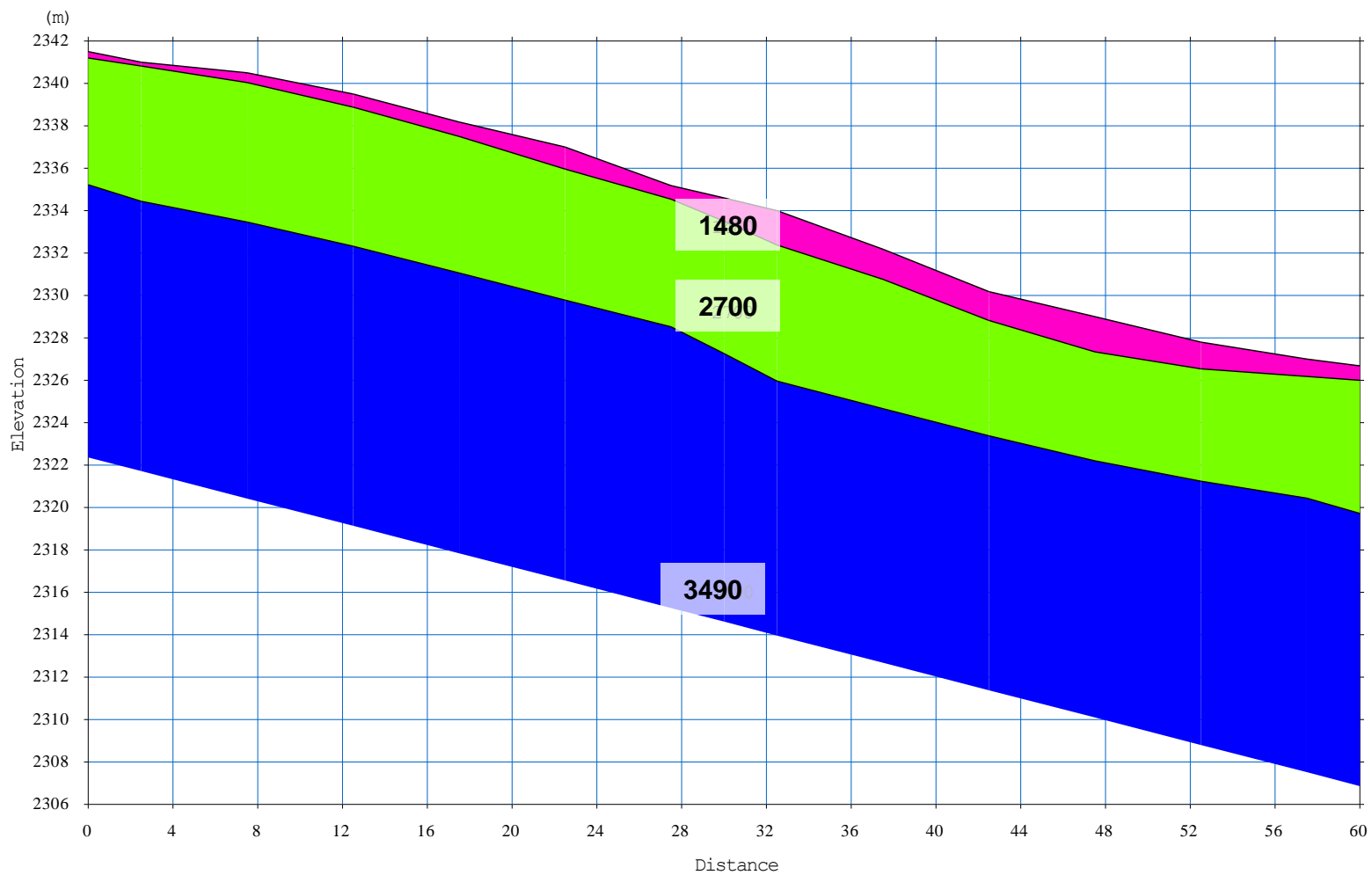


Figura 55. Perfil Geosísmico 4 en velocidad de onda longitudinal VP

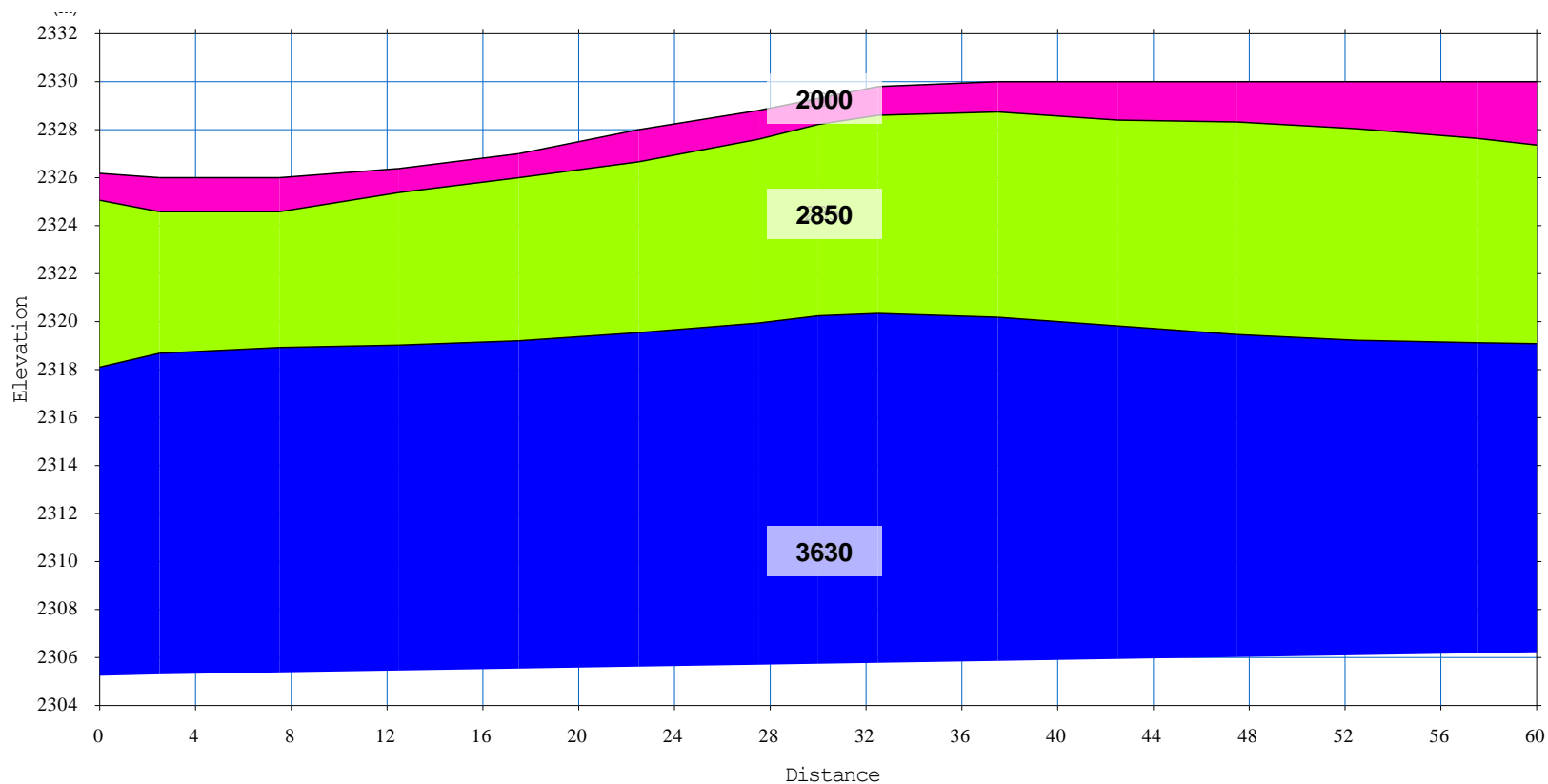


Figura 56. Perfil Geosísmico 5 en velocidad de onda longitudinal VP



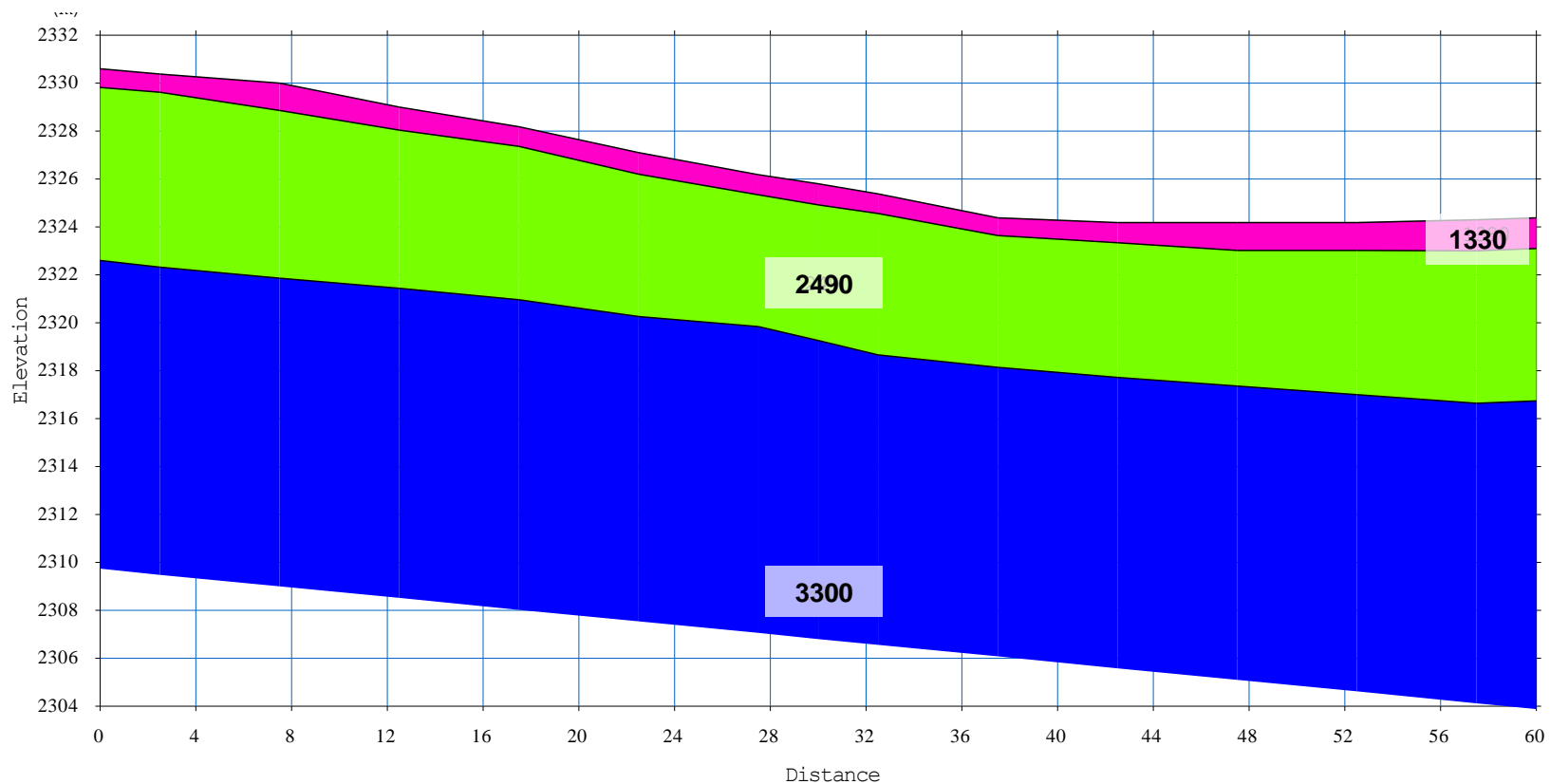


Figura 57. Perfil Geosísmico 6 en velocidad de onda longitudinal VP

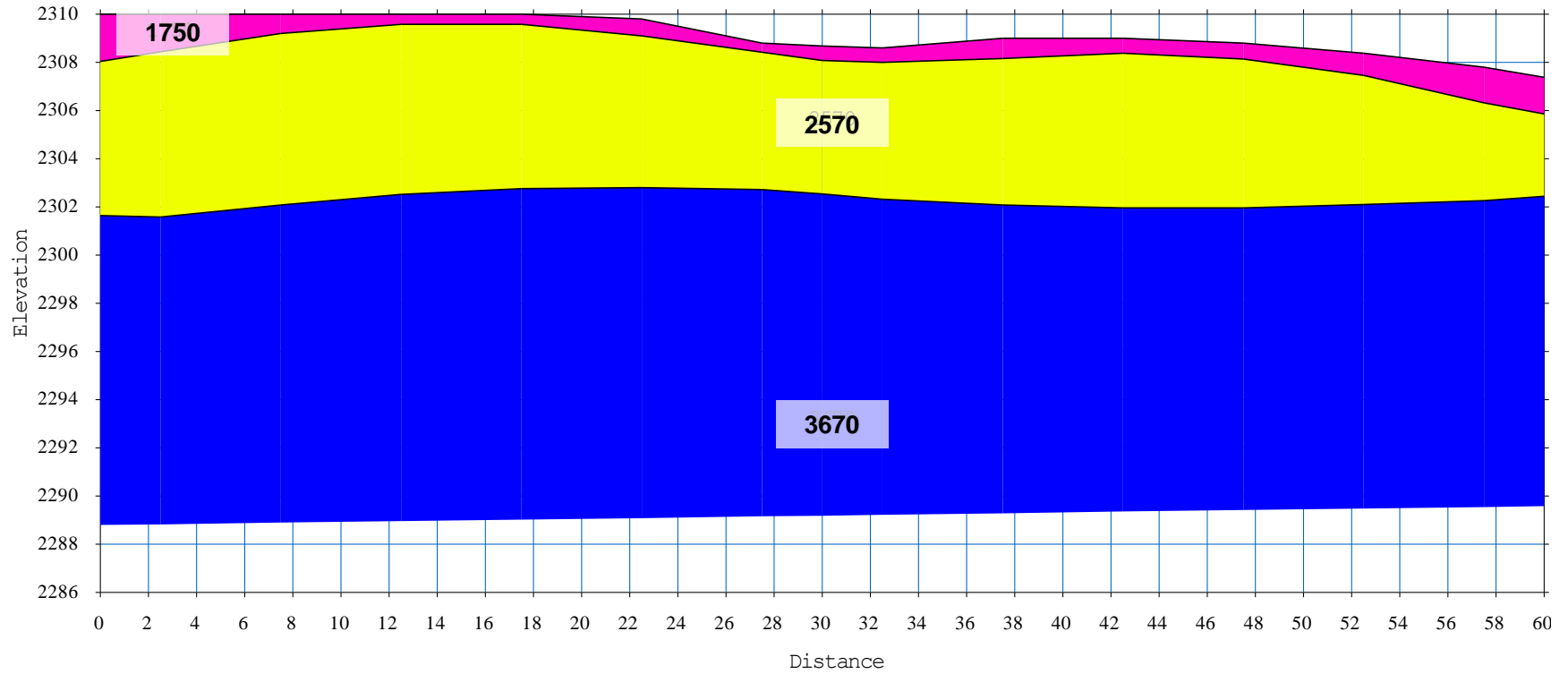


Figura 58. Perfil Geosísmico 7 en velocidad de onda longitudinal VP

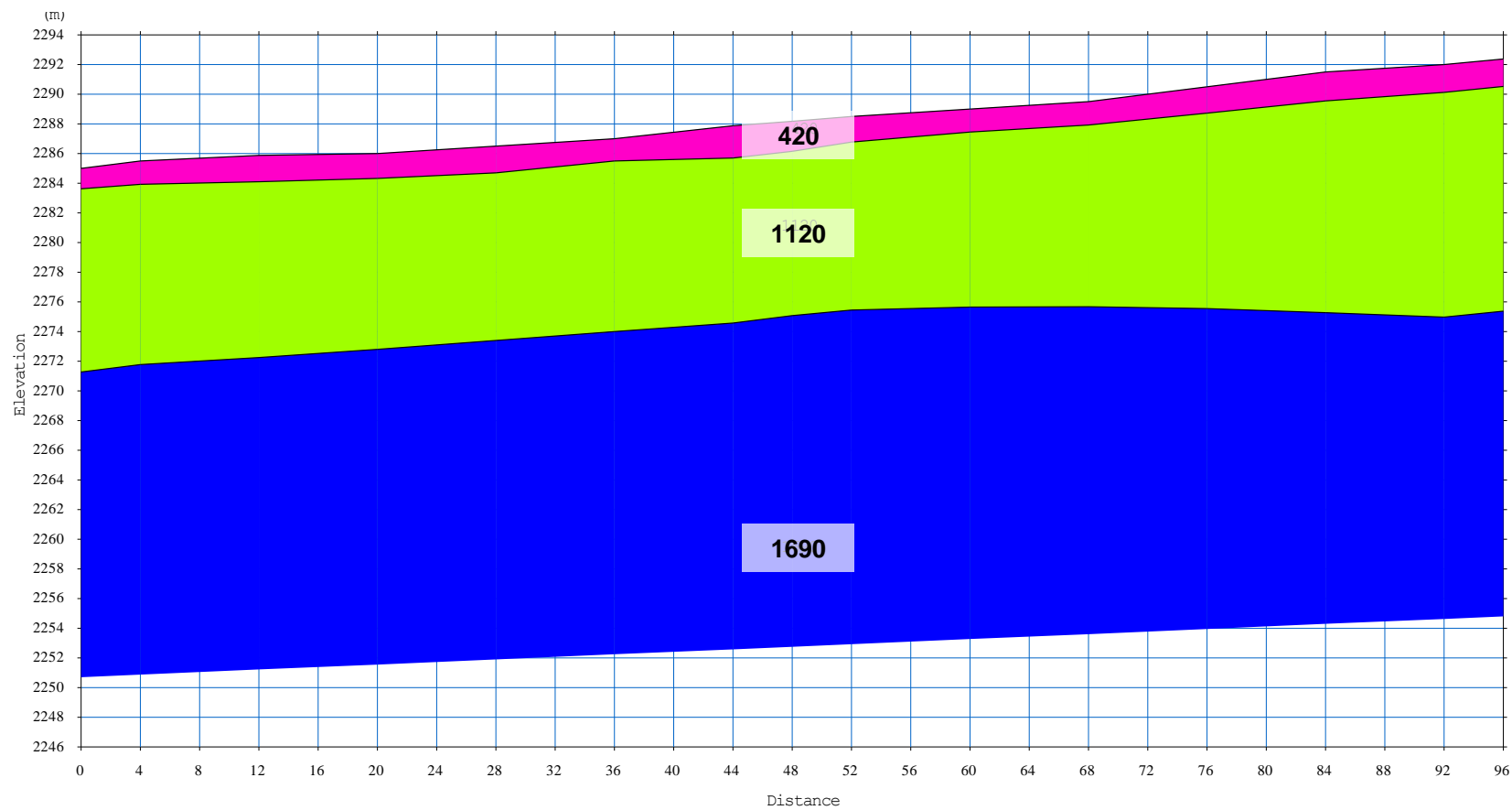


Figura 59. Perfil Geosísmico 1 en velocidad de onda transversal VS

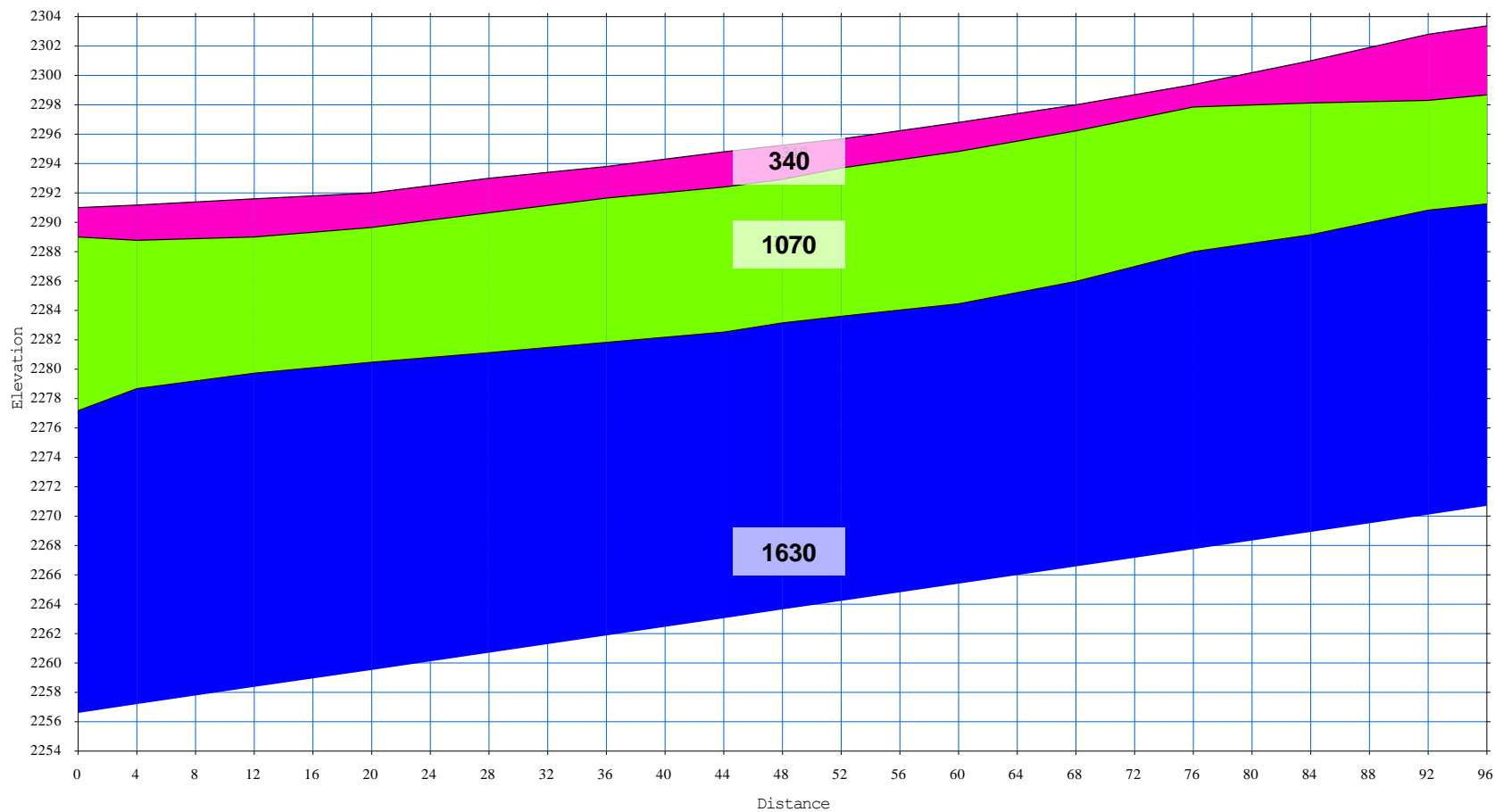


Figura 60. Perfil Geosísmico 2 en velocidad de onda transversal VS

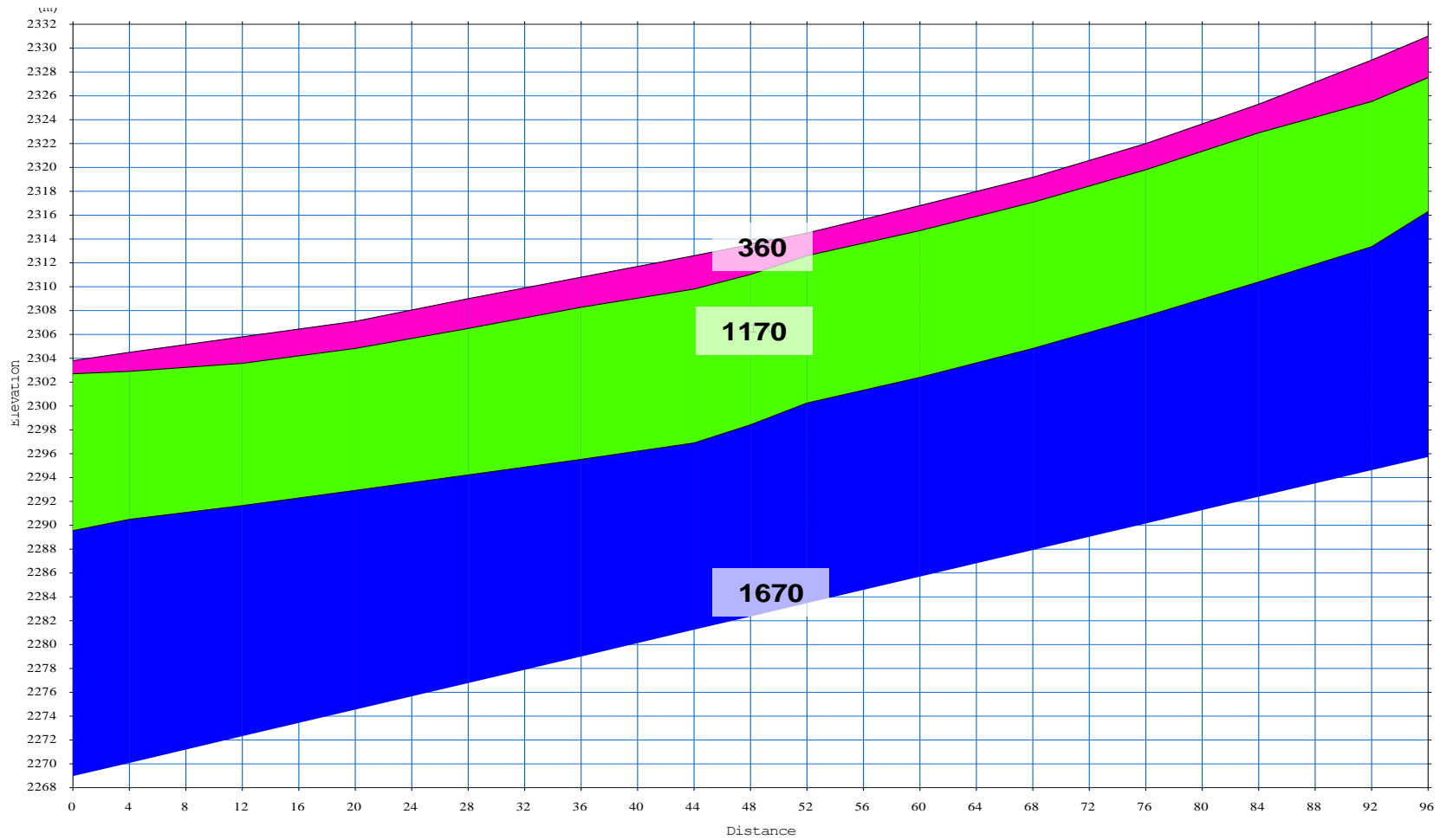


Figura 61. Perfil Geosísmico 3 en velocidad de onda transversal VS

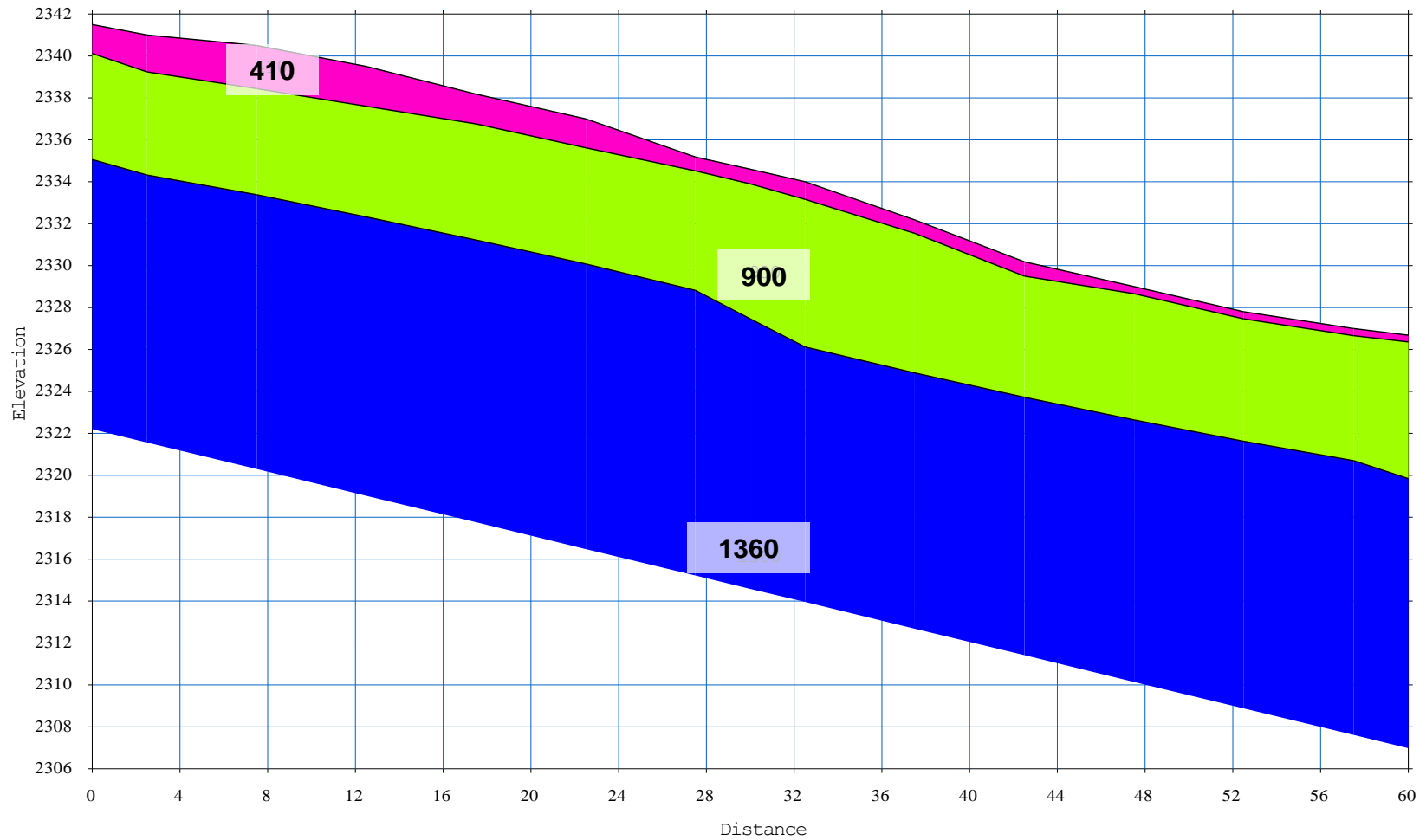


Figura 62. Perfil Geosismico 4 en velocidad de onda transversal VS

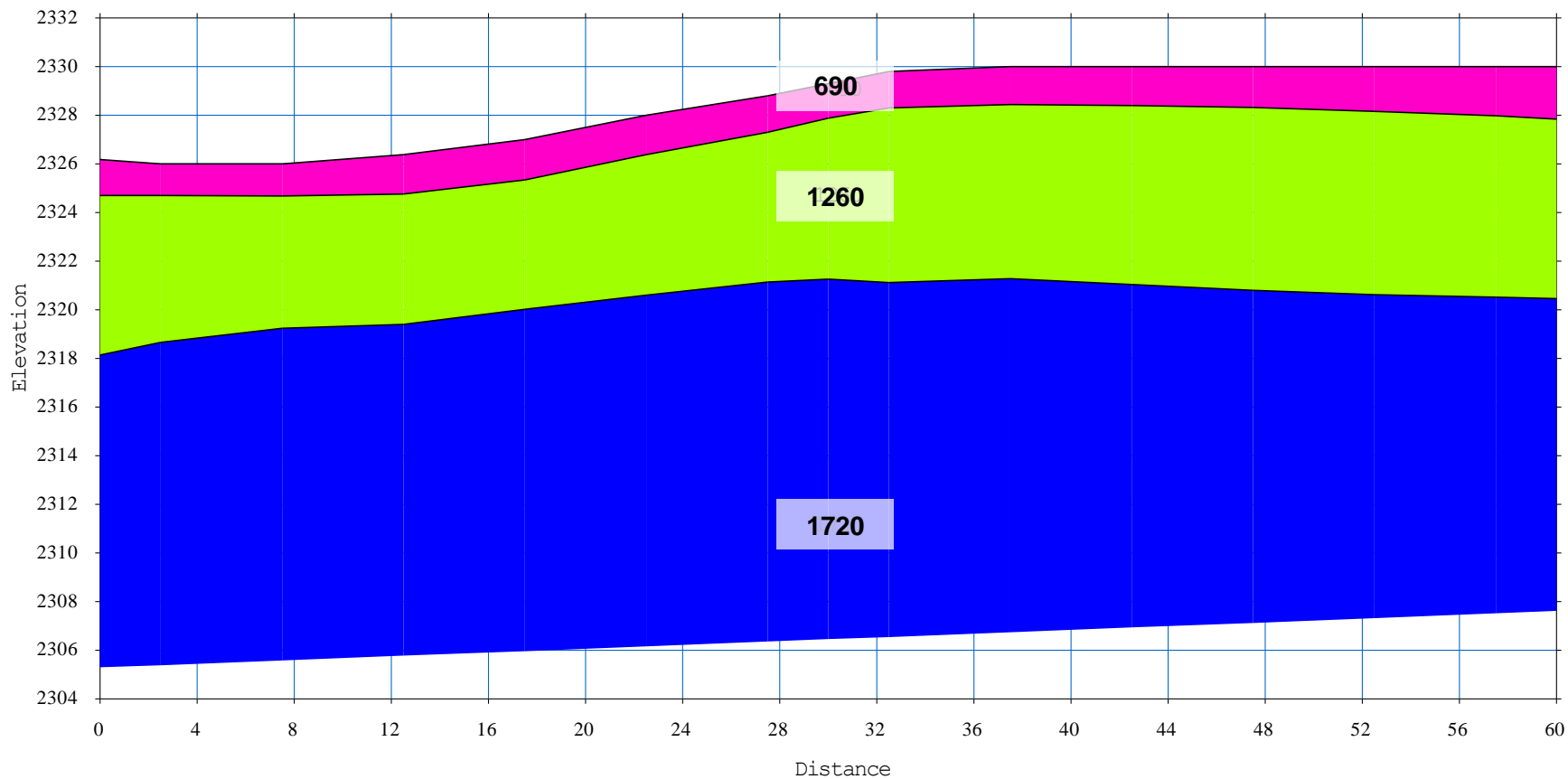


Figura 63. Perfil Geosismico 5 en velocidad de onda transversal VS

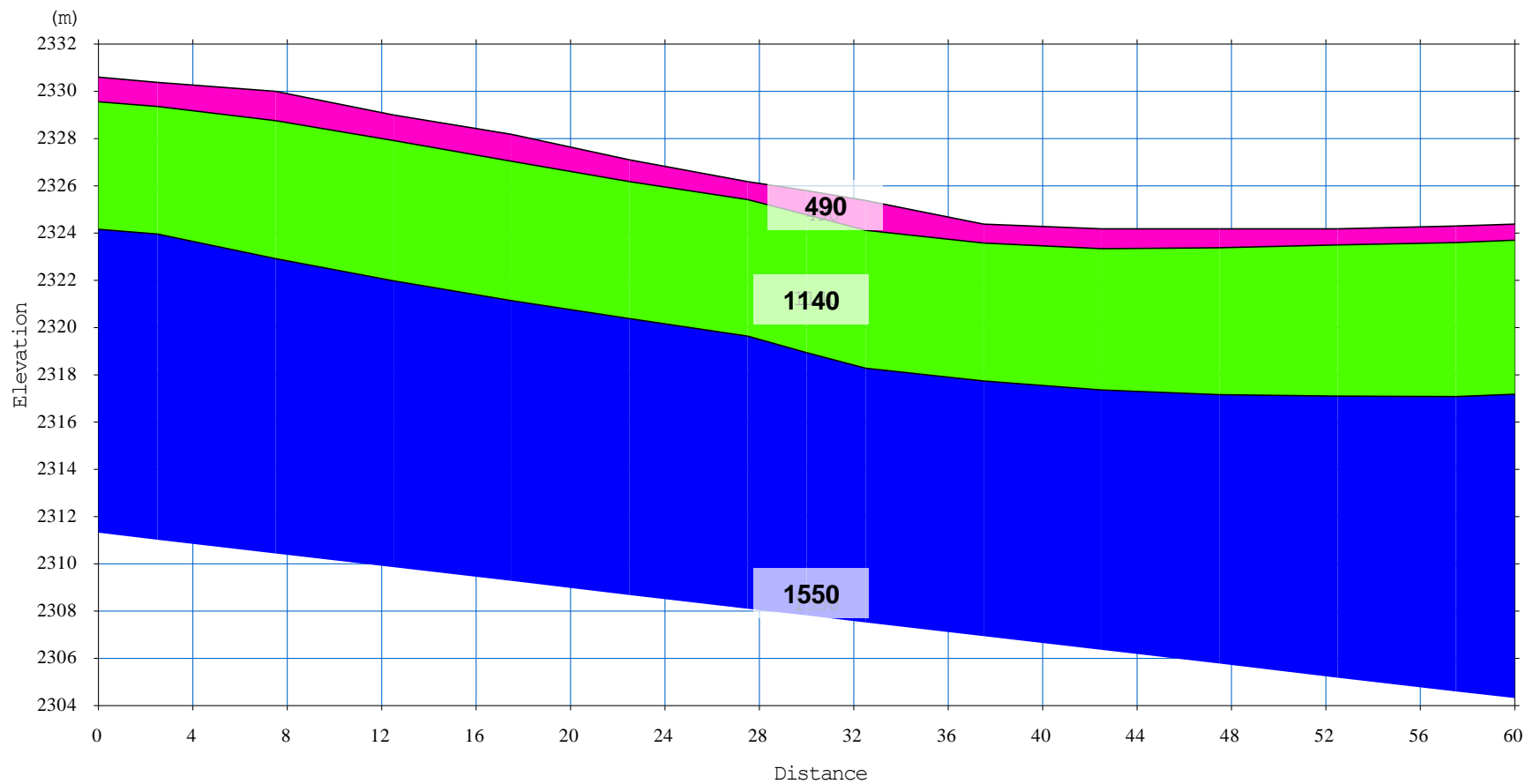


Figura 64. Perfil Geosismico 6 en velocidad de onda transversal VS



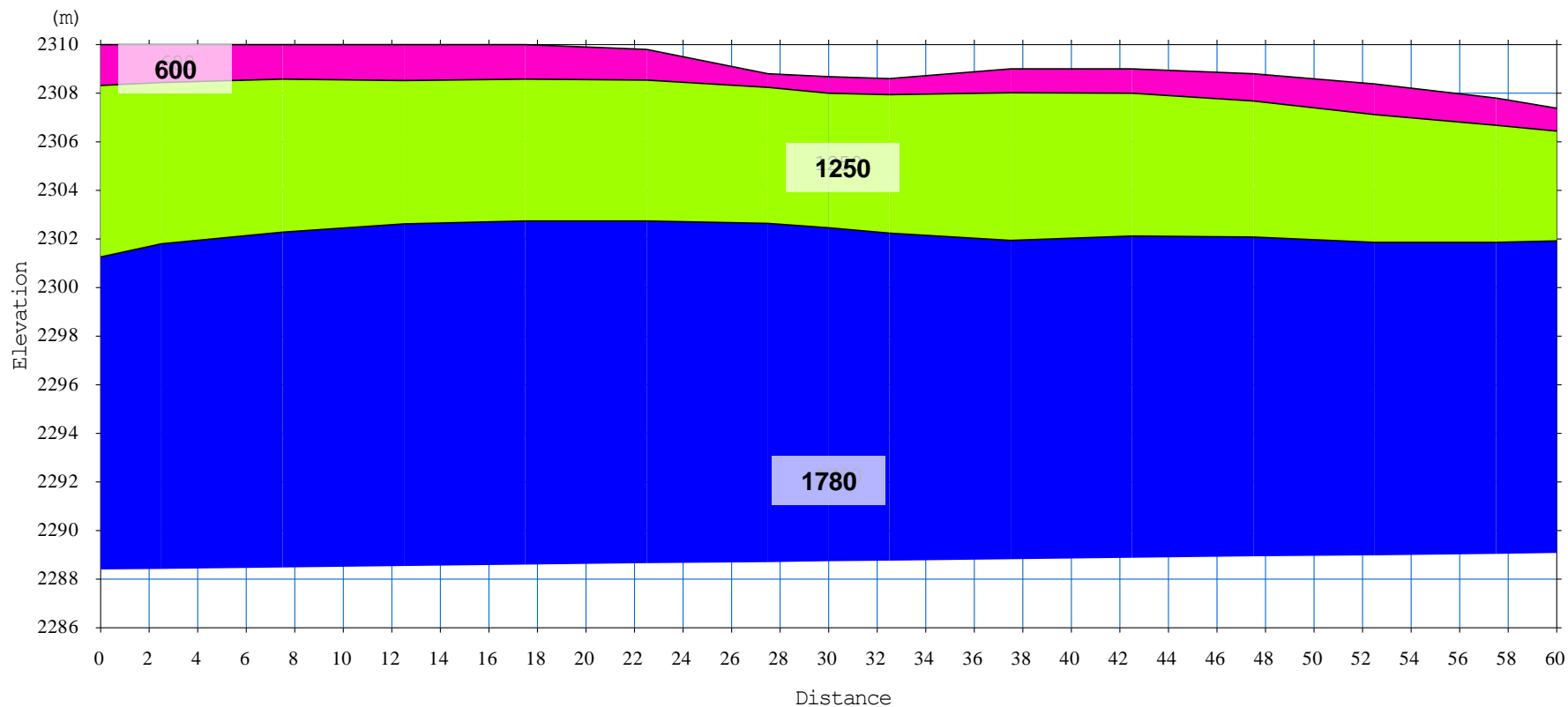


Figura 65. Perfil Geosísmico 7 en velocidad de onda transversal VS

#### 6.4. Determinación de los Módulos Elásticos Dinámicos

A partir de los valores de velocidad de propagación y los pesos volumétricos determinados en laboratorio y/o estimados de acuerdo con su descripción litológica y sus mismas velocidades de propagación, fue posible determinar los valores de los módulos elásticos dinámicos correspondientes a los paquetes de suelo y roca presentes en cada uno de los sitios explorados con los TRS, utilizando para ello las ecuaciones anteriormente descritas. Los valores de los módulos elásticos dinámicos así determinados, se consignan en la tabla de resultados que se muestra al final del presente trabajo y como se puede apreciar, dinámicamente se encuentran bien diferenciados los 3 paquetes litológicos principales, como se indica a continuación:

##### **Primer paquete:**

Constituido por suelos residuales y depósitos de talud en estado suelto en superficie a semicompacto a profundidad con espesor de 1.5 a 2.0 m, presenta condiciones críticas para su estabilidad debido a su alta deformabilidad, caracterizada por su alta relación de Poisson ( 0.43 a 0.47 ), y bajas resistencias, como lo indican sus valores de módulos de Young y Cortante, inferiores a 5.0 y 2.0 ton/m<sup>2</sup>, respectivamente; razón por la cual es necesario removerlo completamente, limpiando y descapotando o retirando los pequeños fragmentos que se encuentran en estado suelto o bien embebiéndolos en concretos pobres a fin de evitar su deterioro y posible caída. Aunque estos fragmentos no representan importante riesgo, sí es conveniente asegurar su retiro o aseguramiento puesto que son los elementos más inestables de todos los encontrados y estudiados.

##### **Segundo paquete:**

Constituido por dacita medianamente fracturada y alterada en los escarpes, presenta obviamente mejores condiciones mecánicas que las del paquete anterior, como lo indica su relación de Poisson de 0.35 a 0.44 y módulos elásticos dinámicos de Cortante y Young mayores a 18.0 y 52.0 ton/m<sup>2</sup>, respectivamente; que corresponden a una roca de buena calidad, capaz de soportar los empujes que le produce la fuerza de la gravedad en los escarpes con pendientes de 70 a 90°; sin embargo considerando su mediana permeabilidad, contenido de finos, tamaño de sus fragmentos y velocidades de propagación, resulta que es conveniente reforzarlo sellando las socavaciones y planos de discontinuidad, a fin de lograr la contribución original del macizo rocoso, ya que sus módulos de cortante indican mediana a alta resistencia, parámetro muy importante en el análisis de estabilidad de los crestones de roca.

##### **Tercer paquete:**

Constituido por dacitas y tobas intactas con muy buenas propiedades mecánicas, como lo indica su relación de Poisson de 0.35 a 0.41 y módulos elásticos dinámicos de Cortante y Young mayores a 46.0 y 130.0 ton/m<sup>2</sup>, respectivamente; por lo que podrían soportar sin mucho problema las inclinaciones que presentan los taludes actuales; sin embargo este caso utópico es poco viable debido a que estos paquetes rocosos se encuentran demasiado profundos.

Con base en los resultados anteriores, de cada uno de los materiales identificados en los 7 TRS distribuidos en los 2 ( tobas y dacitas ), se enumeran los siguientes tipos de materiales:

**MATERIAL 1** - Depósitos de talud y suelos residuales constituidos por materiales en estado suelto y fragmentos de rocas ígneas, con espesores de 1.5 a 2.0 m, de poca consistencia, alta porosidad y permeabilidad, con velocidades longitudinales de 1270 a 2000 m/s. Estos materiales son arables con rendimientos del 80 al 100% utilizando tractores convencionales.

**MATERIAL 2** - Roca descomprimida o fracturada, compacta, parcialmente cementada, porosa y poco permeable, espesor de 5.0 a 12.5 m, velocidades longitudinales comprendidas entre 2490 y 3150 m/s, se estima poco arable con rendimientos bajos del 10 al 25% utilizando equipo pesado o tractores Caterpillar modelos D-10 o más potentes.

**MATERIAL 3** - Roca intacta, sana, homogénea, muy compacta, cementada, poco porosa y poco permeable, espesor indefinido, constituye el basamento local del área en estudio con velocidades mayores a 3000 m/s, por lo que no es arable y por lo mismo se requerirá necesariamente del uso de explosivos para su fragmentación y posterior remoción.

### 6.5. Análisis de Estabilidad de Taludes

Para determinar la estabilidad de los 2 escarpes embebidos por las Manzanas 15 y 16 en cuestión, se procedió en primera instancia a encontrar la génesis de los fragmentos desprendidos y evaluar la estabilidad de los actuales crestones, para posteriormente determinar la contribución de los diferentes macizos rocosos, proponer soluciones de remediación y finalmente mediante un análisis comparativo determinar su eficiencia.

Los crestones de roca están en ambos casos caracterizados por 2 principales familias de discontinuidades:

- 1) Los planos de contacto o depósitos de las capas que construyeron el estrato volcán, dispuestas prácticamente de manera horizontal y con ligero echado macizo adentro.
- 2) Las discontinuidades verticales formadas por bajadas de agua, fracturamientos en la roca expuesta y/o diaclasas de enfriamiento.

Como se comentó anteriormente, son pocas las familias de fracturas, fallas, contactos, diaclasas o grietas presentes en todos y cada uno de los pilares o columnas que conforman los escarpes, situación que indica de un alto a mediano grado de fracturamiento en el macizo rocoso que propicia la fragmentación del material a clastos de pequeño tamaño ( típico de la zona fuertemente intemperizada o descomprimida ), los cuales resultan fácilmente desprendibles debido a la falta de sujeción en su matriz, ya que ésta se va desgastando, deteriorando, relajando o aflojando por el graneado continuo que propician los cambios de temperatura y humedad, así como la erosión eólica y fluvial. Estos desprendimientos continuos forman pequeños depósitos de talud situados al pie de los escarpes<sup>1</sup>.

Estos vectores de salida son relativamente pocos en comparación con la totalidad de los planos de intersección entre las diferentes familias de discontinuidades, lo que conduce en una primera instancia a asegurar que los 2 escarpes o taludes estudiados son prácticamente estables y solo habría que cuidar el desprendimiento de los pequeños fragmentos producidos por el fuerte intemperismo.

Para comprobar lo anteriormente dicho se podría realizar el análisis numérico por elemento finito de la estabilidad de dichos escarpes a través de las secciones consideradas como las más problemáticas debido a su mayor pendiente de escarpe, más socavadas, menores velocidades de propagación y mayor grado de fracturamiento utilizando el programa *PLAXIS Professional* versión BV8.6. Para ello

<sup>1</sup> Indicado en las fotografías del anexo 2

obviamente se requiere del levantamiento topográfico a detalle.

El criterio de *Brandecker* se utilizó para la clasificación de los macizos rocosos en rocas volcánicas, como es el caso que nos ocupa. De acuerdo con esta clasificación, resulta que los escarpes en estudio corresponderían a los descritos como rocas sanas y por lo mismo debieran tener ángulos de reposo entre  $63$  y  $72.5^\circ$ , dependiendo de la altura de las bermas y ancho de sus plataformas.

Otros criterios para evaluar la calidad de la roca en macizos volcánicos corresponden a los propuestos por *Schneider* para construcción de grandes presas, los cuales han sido publicados por la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (1985), y la Comisión Nacional del Agua (1993), los cuales establecen como punto de partida la correlación empírica entre los módulos elásticos dinámicos y la calidad de la roca. A partir de este principio se ha comprobado empíricamente la correlación que existe entre el ángulo óptimo de inclinación del talud y los módulos elásticos dinámicos de Cortante obtenidos a través de los TRS, la cual cualitativamente se muestra en la siguiente tabla. Como se puede observar, para rocas de buena a muy buena calidad, las inclinaciones de los taludes son mayores a  $60^\circ$ , como pudiera ser el caso a comprobar toda vez que se tenga la topografía a detalle.

PRUEBA	Vp ( m/s )	Vs ( m/s )	Peso Vol. ( ton/m <sup>3</sup> )	(Vp/Vs) <sup>2</sup>	Coefficiente de Poisson	Modulo de Cortante ( kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo de Elasticidad ( kg/cm <sup>2</sup> )	Ángulo del Talud (°)	Calidad de Roca
TRS	400	20	1.450	400.00	0.50	6	18	28	Muy Mala
TRS	650	40	1.600	264.06	0.50	26	78	29	Muy Mala
TRS	800	60	1.700	177.78	0.50	62	187	30	Muy Mala
TRS	1250	120	1.750	108.51	0.50	257	768	31	Mala
TRS	1400	150	1.800	87.11	0.49	413	1,234	32	Mala
TRS	1550	180	1.900	74.15	0.49	628	1,874	33	Mala
TRS	2000	260	2.000	59.17	0.49	1,378	4,111	34	Mala
TRS	2200	400	2.100	30.25	0.48	3,425	10,158	37	Regular
TRS	2400	700	2.150	11.76	0.45	10,739	31,219	44	Regular
TRS	2700	860	2.250	9.86	0.44	16,963	48,975	49	Regular
TRS	3000	1200	2.300	6.25	0.40	33,761	94,854	60	Buena
TRS	3500	1650	2.400	4.50	0.36	66,606	180,784	72	Buena
TRS	4000	1950	2.450	4.21	0.34	94,966	255,292	78	Muy Buena
TRS	4500	2150	2.500	4.38	0.35	117,801	318,558	81	Muy Buena
TRS	5000	2450	2.550	4.16	0.34	156,028	418,786	85	Muy Buena

Tabla 5.- Módulos Elásticos Dinámicos vs Ángulo de Talud

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del análisis e integración de los resultados mostrados anteriormente se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

La vivienda es el parámetro básico de los asentamientos humanos. Ella permite la agrupación de las personas, usualmente familias, con fines especializados relacionados al reposo, la alimentación y la vida en común y su entorno constituye el vínculo social elemental de la interrelación productiva global del hombre. La vivienda tiene múltiples dimensiones que abarcan la agenda cultural, política y económica. La vivienda constituye desde diferentes ópticas una representación de la familia como el vestuario constituye una representación del individuo. Ellos expresan, de modo pragmático pero aún simbólico, los sistemas de valores socialmente aceptados por la familia y el individuo. De este modo en la vivienda se reflejan las estructuras sociales y con ella las jerarquías y los sistemas de privilegio que resaltan unos individuos sobre otros, no importando que estos “asentamientos humanos” usurpen el libre paso a las vías primarias de comunicación.

El análisis de las tendencias en el crecimiento demográfico y en el proceso de urbanización da un panorama bastante preciso de la localización de las principales concentraciones sociales y económicas principalmente en esta parte de la Delegación Gustavo A. Madero.

El estado en que se encuentran los habitantes de los alrededores del Cerro del Chiquihuite sigue siendo de alto riesgo. A pesar de las medidas para reforzar la seguridad éstas no necesariamente resultan suficientes, sobre todo porque se sigue extendiendo la mancha urbana, como se muestra en la figura siguiente. El Cerro del Chiquihuite es una de las zonas en donde el riesgo existente pone en peligro a un gran número de habitantes, tanto en la Delegación Gustavo A. Madero como del municipio de Tlalnepantla. La Delegación Gustavo A. Madero ocupa el 11° lugar entre las 16 delegaciones del Distrito Federal en densidad poblacional con 205.1 habitantes/ha en 2008. Sin embargo, dentro del territorio de la delegación se tienen áreas tanto de alta como de baja densidad. En consecuencia, un número significativo de familias se encuentran en riesgo de sufrir eventos como los anteriormente descritos, tanto en sus propiedades como en las avenidas de la zona.



Figura 66. Crecimiento acelerado de la población sobre los márgenes del Cerro del Chiquihuite.

La Prospección Geofísica es una de las técnicas más usadas en los métodos de exploración o ingeniería Geofísica, como es conocida actualmente. En la prospección Geofísica existen los métodos de Geosísmica y Geoeléctrica, que son los utilizados en la ingeniería Geológica, y propiamente para estos casos en que se requiere hacer estudios para evitar derrumbes sobre construcciones y vialidades.

La prospección Geofísica, ofrece excelentes perspectivas para la obtención de parámetros que permiten remediar edificaciones urbanas, libre paso de vehículos particulares y transporte público; por medio de la determinación de los contactos suelo-roca alterada, roca sana, caracterización de macizos rocosos, análisis de estabilidad de taludes, análisis de vibraciones del terreno con criterios de seguridad a la población a fin de evitar algún siniestro y otros aspectos que hacen posible evaluar en forma global a las vías terrestres.

La facilidad para acceder a la zona de estudio, vías principales, avenidas secundarias, carreteras, caminos vecinales, brechas, etcétera- aumenta el grado de dificultad en la aplicación de algunos métodos Geoelectrónicos, y por ende los costos y el tiempo requerido para la realización de éste trabajo.

- Se tiene proyectado la remediación de los pilares o crestones de roca situados entre las avenidas Huitzilopochtli, Otoño y Verano en las faldas del Cerro del Chiquihuite que constituyen las denominadas Manzanas 15 y 16, por tal motivo se realizaron los estudios geotécnicos y geológicos del macizo rocoso, a fin de diseñar el tipo de remediación que garantice la estabilidad total de estos crestones o escarpes rocosos ante solicitaciones estáticas y dinámicas del sitio. Una parte de dichos estudios consistió en la realización de un levantamiento Geológico a detalle y de mediciones geofísicas (Exploración Geoelectrónica y Geosísmica), en diferentes líneas de exploración distribuidas a todo lo largo de las avenidas principales (Huitzilopochtli, Otoño y Verano), debido a que se consideró que estos métodos constituyen una buena forma para analizar al macizo rocoso constituido fundamentalmente por paquetes alternados de tobas y dacitas.
- Del análisis de la información recopilada y de los cadenamientos de campo se pudo constatar que las manzanas 15 y 16 en cuestión se encuentran en la parte superior de los crestones de dacita que se encuentran intercalados con tobas, ambas del Terciario Superior y que en conjunto constituyen una costilla ubicada al pie de las faldas de la porción Poniente del Cerro del Chiquihuite, por lo que corresponde con la Zona I (zona de lomas), denominada por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal.
- Los materiales tobáceos, dacíticos y basálticos que constituyen las faldas del Cerro del Chiquihuite y que se clasifican geotécnicamente como Zona I, presentan baja permeabilidad y por consiguiente no propician la infiltración del agua de lluvia, escurriendo mayoritariamente por sus laderas y constituyendo una zona de recarga de los acuíferos del lugar en las partes situadas topográficamente más bajas. A poca profundidad es factible encontrar estos materiales piroclásticos con buenas posibilidades acuíferas, así como roca volcánica fracturada la cual constituye el basamento local del sitio.
- El análisis de la fotografía aérea de 2008 establece que los 4 escarpes presentan una geomorfología estable, con las mismas bajadas de agua que delimitan las columnas de roca aparentemente inestables y sin evidencias de desprendimientos de grandes bloques, por lo que la transformación del macizo se realiza lentamente a través de cambios graduales por su alta calidad de roca, en donde los principales agentes erosivos sólo ocasionan modificaciones leves del relieve.
- Desde el punto de vista regional, 2 son los paquetes o cuerpos de roca principales presentes en el sitio estudiado:

### **PAQUETE 1**

- 1) En la parte superior y con espesor de 30 a 50 m se presenta el primer paquete constituido por dacitas alternadas con tobas fundamentalmente arenosas, como lo indican sus resistividades de 7 a 61 Ohm-m, distribuido uniformemente con espesores menores en las partes altas que engrosan gradualmente hacia las partes topográficamente más bajas, en los cuales



predominan los materiales poco permeables. Debido a su uniformidad, se puede asegurar que el basamento en el cual descansa no se encuentra afallado o dislocado, por lo que se descarta la existencia de fallas regionales en el subsuelo profundo que pudieran repercutir en posibles asentamientos diferenciales por efecto de los fenómenos de subsidencia, es decir, que se pudieran acomodar por el cambio en el estado de esfuerzos que produce el abatimiento de los niveles freáticos.

Este paquete litológico constituido por alternancia de tobas y dacitas, se subdivide a su vez en:

- 1.1. El primero de ellos y más superficial está constituido por suelos residuales y depósitos de talud en estado suelto en superficie a semicompacto a profundidad con espesor de 1 a 2 m, presenta velocidades longitudinales de 1270 a 2000 m/s y transversales de 340 a 690 m/s, indicativas de materiales de mediana calidad que resultan removibles con cualquier tipo de maquinaria, obteniendo rendimientos variables, según sea el caso, del 35 al 70%. Dinámicamente se encuentra caracterizado por su alta relación de Poisson de 0.43 a 0.47 y bajas resistencias, como lo indican sus valores de módulos de Young y Cortante, inferiores a 5 y 2 ton/m<sup>2</sup>, respectivamente; razón por la cual es necesario removerlo completamente, limpiando y descapotando o retirando los pequeños fragmentos que se encuentran en estado suelto o bien embebiéndolos en concretos pobres a fin de evitar su deterioro y posible caída. Aunque estos fragmentos no representan importante riesgo, sí es conveniente asegurar su retiro puesto que son los elementos más inestables de todos los encontrados y estudiados.
- 1.2. Subyaciendo a lo anterior y con espesor de 5 a 12.5 m, se presenta el segundo paquete constituido por dacita medianamente fracturada y alterada en los escarpes. Sus velocidades de propagación longitudinal varían de 2490 a 3150 m/s y sus velocidades transversales de 900 a 1260 m/s, valores que determinan una buena calidad de roca, por lo que seguramente las pendientes de los crestones o escarpes se mantendrán estables, aunque no se descarta el requerir algún tipo de tratamiento para soportarlos y minimizar su riesgo potencial. Presenta obviamente mejores condiciones mecánicas que las del paquete anterior, como lo indica su relación de Poisson de 0.35 a 0.44 y módulos elásticos dinámicos de Cortante y Young mayores a 18 y 52 ton/m<sup>2</sup>, respectivamente; que corresponden a una roca de buena calidad, capaz de soportar los empujes que le produce la fuerza de la gravedad en los escarpes con pendientes de 70 a 90°; sin embargo considerando su mediana permeabilidad, contenido de finos, tamaño de sus fragmentos y velocidades de propagación, resulta que es conveniente reforzarlo sellando las socavaciones y planos de discontinuidad, a fin de lograr la contribución original del macizo rocoso, ya que sus módulos de cortante indican mediana a alta resistencia. Este paquete denominado zona descomprimida es muy importante debido a que representa el estado de los escarpes.
- 1.3. Por último, a partir de los 6.5 a 14.0 m de profundidad y constituyendo la roca basal del proyecto con espesor indefinido, se presenta la roca intacta constituida por dacitas con diferentes grados de fracturamiento y en ocasiones con tobas intercaladas, como lo indican sus velocidades longitudinales de 3300 a 4060 m/s y velocidades transversales de 1360 a 1780 m/s, la cual desde el punto de vista mecánico corresponde con una roca muy compacta y poco fracturada que resulta no arable, por lo que requeriría en un caso hipotético forzosamente del uso de explosivos para su fragmentación y posterior remoción. Presenta buenas propiedades mecánicas, como lo indica su relación de Poisson de 0.35 a 0.41 y módulos elásticos dinámicos de Cortante y Young mayores a 46 y 130 ton/m<sup>2</sup>, respectivamente; por lo

que podrían soportar sin mucho problema las inclinaciones que presentan los taludes actuales.

## PAQUETE 2

1. Le subyace un importante paquete de espesor indefinido y resistividades altas a intermedias de 40 a 243 Ohm-m que posiblemente correspondan con andesitas y tobas de mediana a alta permeabilidad que constituyen el basamento geológico del sitio con buenas posibilidades acuíferas, ya que, cabe hacer notar que aproximadamente a la elevación 2140 msnm, esto es entre 150 y 200 m de profundidad, se observa en todos los SEV un decaimiento de los valores de resistividad que pudiera corresponder con la presencia del nivel de aguas freáticas.

1.1. Con base en los resultados anteriores, y considerando las propiedades físicas de fracturamiento, dureza, litología, velocidad, resistencia y arabilidad de cada uno de los materiales identificados en los 7 TRS distribuidos en los 2 taludes más escarpados, se identificaron geotécnicamente los siguientes tipos de materiales:

**MATERIAL 1** - Depósitos de talud y suelos residuales constituidos por materiales en estado suelto y fragmentos de rocas ígneas, con espesores de 1.5 a 2.0 m, de poca consistencia, alta porosidad y permeabilidad, con velocidades longitudinales de 1270 a 2000 m/s. Estos materiales son arables con rendimientos del 80 al 100% utilizando tractores convencionales.

**MATERIAL 2** - Roca descomprimida o fracturada, compacta, parcialmente cementada, porosa y poco permeable, espesor de 5.0 a 12.5 m, velocidades longitudinales comprendidas entre 2490 y 3150 m/s, se estima poco arable con rendimientos bajos del 10 al 25% utilizando equipo pesado o tractores Caterpillar modelos D-10 o más potentes.

**MATERIAL 3** - Roca intacta, sana, homogénea, muy compacta, cementada, poco porosa y poco permeable, espesor indefinido, constituye el basamento local del área en estudio con velocidades mayores a 3000 m/s, por lo que no es arable y por lo mismo se requerirá necesariamente del uso de explosivos para su fragmentación y posterior remoción.

- Los 2 crestones de roca estudiados están caracterizados por 2 principales familias de discontinuidades, como son:
  - Los planos de contacto o depósitos de las capas que construyeron el estrato, dispuestas prácticamente de manera horizontal y con ligera inclinación o echado macizo adentro.
  - Las discontinuidades verticales formadas por bajadas de agua, fracturamientos en la roca expuesta y/o diaclasas de enfriamiento.
- Se puede asegurar que en los escarpes no hay grandes bloques inestables que amenazan con deslizarse a través de sistemas de cuñas, sino pequeños fragmentos resultantes por el intemperismo que producen los agentes erosivos constantemente actuantes ( agua y viento principalmente ), en las rocas Terciarias descubiertas, no en las urbanizadas y protegidas por las mismas construcciones; los cuales se manifiestan a través de discontinuidades verticales y

pequeñas socavaciones que no repercuten significativamente en la estabilidad de los crestones de roca.

- El sitio en estudio con sus 4 escarpes se puede caracterizar en función de sus pendientes a partir de los siguientes dominios geotécnicos:
  - 1) Aquellos con pendientes suaves, con inclinaciones comprendidas en el intervalo de 2 a 25°, que corresponden con las zonas topográficamente más bajas y mesetas entre los escarpes, aprovechadas para el tránsito de vehículos en las actuales avenidas. Obviamente son estables y constituyen aproximadamente el 94% de la zona estudiada.
  - 2) Aquellos con pendientes comprendidas entre 25 y 70° de inclinación, que corresponden con zonas de roca intemperizada, poco alterada, con escarpes de medianamente pronunciados a muy pronunciados en los cuales por lo general aflora la roca, aunque es difícil percibirlo actualmente debido al desarrollo inmobiliario de la zona, el cual permite únicamente la inspección de los escarpes más pronunciados. Estas franjas del terreno abarcan aproximadamente el 6% del sitio estudiado. Obviamente, en este dominio se ubican los escarpes o de roca que constituyen los crestones aparentemente inestables que propician el desprendimiento de pequeños bloques y graneos. Estos desprendimientos continuos forman pequeños depósitos de talud situados al pie de los escarpes.
- La irregularidad de los planos de contacto y articulación de la masa que le producen las tobas volcánicas y coladas dacíticas, que ocasionan un incremento en sus velocidades de cortante, le confiere una compacidad adicional que incrementa significativamente a la estabilidad de los cortes o escarpes. La calidad de roca de este segundo paquete es buena debido sobretodo a su alta resistencia mecánica y poco fracturamiento; situación que obviamente resulta favorable para garantizar la estabilidad de los escarpes, determinándose en función de sus velocidades que resulta poco arable a no arable, por lo que los posibles rendimientos en caso de requerir su remoción se pronostican bajos.
- Como se comentó anteriormente, son pocas las familias de fracturas, fallas, contactos, diaclasas o grietas presentes en todos y cada uno de los pilares o columnas que conforman los escarpes, situación que indica de un alto a mediano grado de fracturamiento en el macizo rocoso que propicia la fragmentación del material a clastos de pequeño tamaño ( típico de la zona fuertemente intemperizada o descomprimida ), los cuales resultan fácilmente desprendibles debido a la falta de sujeción en su matriz, ya que ésta se va desgastando, deteriorando, relajando o aflojando por el graneos continuo que propician los cambios de temperatura y humedad, así como la erosión eólica y fluvial. Estos desprendimientos continuos forman pequeños depósitos de talud situados al pie de los escarpes, como lo indican algunas de las fotografías del Anexo 2.
- De acuerdo con la clasificación de *Brandecker* (figura 67), resulta que los escarpes en estudio corresponderían a los descritos como rocas sanas y por lo mismo debieran tener ángulos de reposo entre 63 y 72.50°, dependiendo de la altura de las bermas y ancho de sus plataformas; clasificación teórica que se pudiera comprobar toda vez que se tenga la topografía a detalle.
- Resumiendo, la calidad de la roca de los escarpes expuestos en las Manzanas 15 y 16 es

buena, lo cual repercute favorablemente en la estabilidad de los crestones de roca; sin embargo es necesario garantizar su estabilidad a partir de las siguientes recomendaciones generales de tratamiento:

- 1) Deberá de asegurarse el rellenar las diversas socavaciones realizadas por los lugareños a fin de ganar espacios con mampostería.
- 2) Sellar las grietas con gravas, tezontles y concretos pobres.
- 3) Calafatear las fracturas y
- 4) Drenar el agua almacenada a través de barrenos colocados en la base de los crestones de roca.
- 5) Es necesario la construcción de muros de contención, así como los trabajos de estabilización de talud y aseguramiento a la población asentada en barrancas y cauces del Cerro del Chiquihuite, el mantenimiento y desazolve de la red primaria y secundaria de drenaje, esto evitara daños severos a las vías primarias de acceso a las comunidades aledañas.

La susceptibilidad a los deslizamientos o derrumbes, está relacionada con las características geológicas del sitio además de la formación de discontinuidades que se van generando debido a muchos factores. La litología, la geomorfología, la estructura y el estado de meteorización, entre otros, son factores determinantes en la ocurrencia de deslizamientos. Principalmente este fue el tema de estudio hacer notar estos problemas de caídos de roca en una zona de alto riesgo sobre las comunidades aledañas al Cerro del Chiquihuite. Estudios de esta índole constituyen un buen ejemplo de la aplicación de la Geología y la Geofísica a problemas de deslizamientos y caídos sobre zonas habitadas y en vialidades, éste último caso que frecuentemente se presenta en carreteras y Autopistas de México.

## CLASIFICACIÓN DE BRANDECKER ( 1971 )

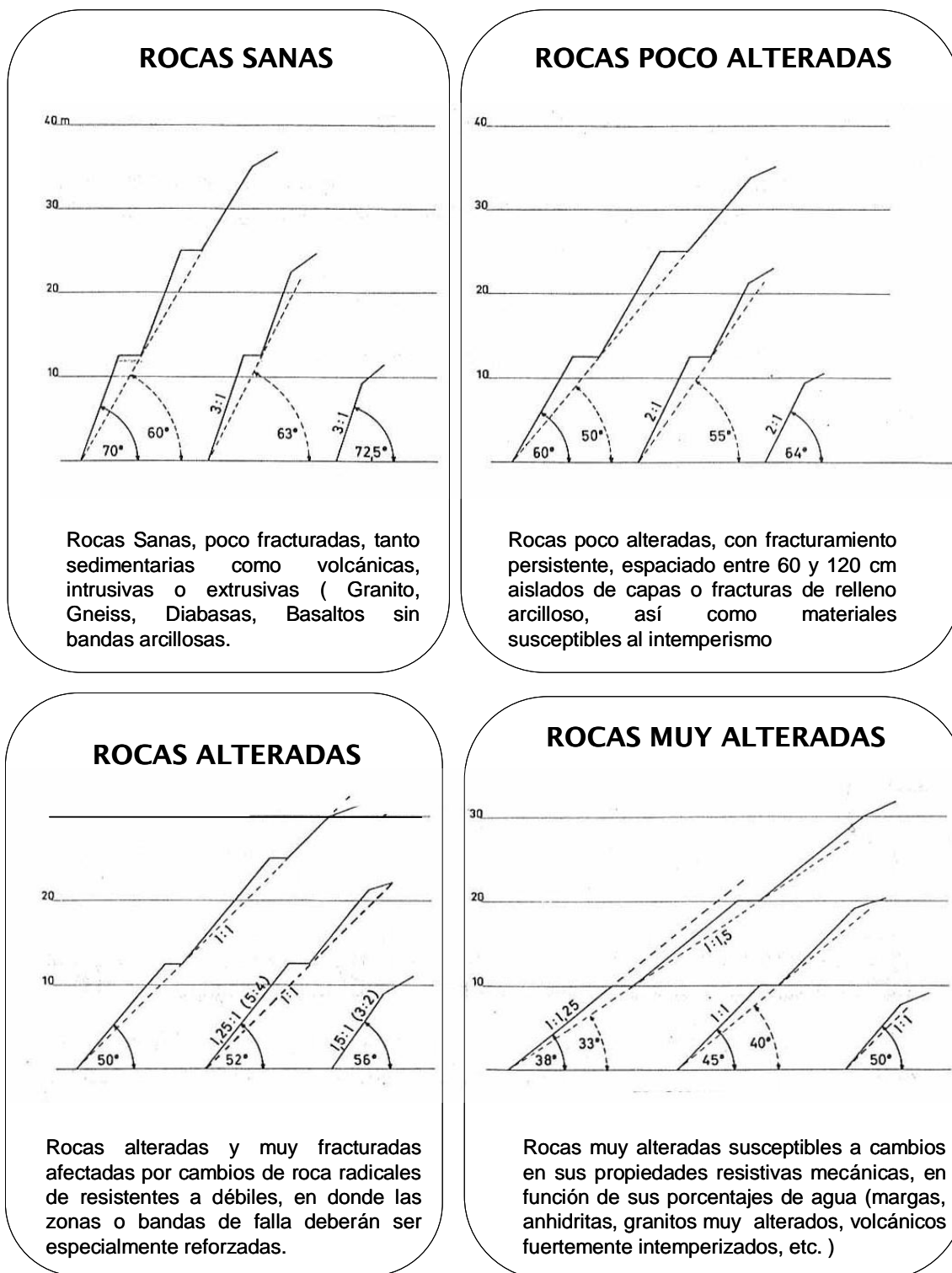


Figura 67.- Clasificación de Brandecker (1971)

## 8. REFERENCIAS

Lugo-Hubp J. Mapa geomorfológico del Occidente de la Cuenca de México. *Investigaciones Geográficas*, (21):9-11. 1990.

Lugo-Hubp J. y Salinas-Montes A. Geomorfología de la Sierra de Guadalupe (al Norte de la Ciudad de México) y su relación con peligros naturales. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(2):240-251. 1996.

Salazar-Mitre L.M. Geología y riesgos asociados en el Valle de México. Riesgos Ambientales para la salud en la Cuenca de México, Programa Universitario del Medio Ambiente, UNAM. México, pp. 267-276. 1996.

Fundamentos de Geofísica  
Agustín Udías Vallina  
España. 2003  
Ed. Alianza

Ingeniería, investigación y tecnología  
2010 Facultad de Ingeniería, UNAM  
Facultad de Ingeniería, UNAM,  
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán,  
C.P. 04510, México, D.F., A.P. 70-440

Peligros y riesgos geológicos de la cuenca de México: hacia una visión integral. Instituto de Geofísica, UNAM. 2007

<http://geofisapl.cicese.mx/geofisica/people/research/lgallardo/software.html>

<http://inegi.gob.mx>