U N I V E R S I D A D N A C I O N A L

A U T Ó N O M A D E M É X I C O

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CARACTERIZACIÓN DE FALLAS Y ESTRUCTURAS SOMERAS USANDO TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA

T E S I S

Q U E P A R A O B T E N E R E L T Í T U L O D E:

INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A:

FILIBERTO VERGARA HUERTA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA ARCINIEGA CEBALLOS

Ciudad Universitaria enero 2011

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN ..... **III**

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1 SAN MIGUEL TOCUILA, ESTADO DE MÉXICO 2
1.2 CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN 3
1.3 OBJETIVOS 5

2. MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA **6**

2.1 MÉTODOS SÍSMICOS 6
2.1.1 MÉTODO DE REFRACCIÓN 7
2.1.2 MÉTODO DE REFLEXIÓN *8*
2.2 MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE REFRACCIÓN SÍSMICA 10
2.3 TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA 12

3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS **16**

3.1 TRABAJO DE CAMPO 16
3.2.1 MÓDULO DE PICKWIN 19
3.2.2 MÓDULO DE PLOTREFA *20*

4. CASO DE ESTUDIO SAN MIGUEL TOCUILA, ESTADO DE MÉXICO **23**

4. 1 GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO 23
4. 1. 1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA 23
4. 1. 2 GEOLOGÍA REGIONAL 24
4. 1. 3 GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE TEXCOCO *26*
4. 2 MARCO ARQUEOLÓGICO Y PALEONTOLÓGICO 27
4. 3 ESTUDIO DE TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA 30
4. 3. 1 ESTUDIOS PREVIOS 30
4. 3. 2 DISEÑO DEL ESTUDIO 33
4. 3. 3 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN *35*

5. CASO DE ESTUDIO CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN DE OCAMPO **46**

5.1 GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA 46
5.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA 46
5.1.2 GEOLOGÍA REGIONAL 47
5.1.3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE MORELIA 48
5.1.3 PROCESO DE SUBSIDENCIA 54
5.2 ESTUDIO DE TOMOGRAFIA DE REFRACCION SISMICA 56
5.2.1 ESTUDIOS GEOFÍSICOS PREVIOS 56
5.2.2 DISEÑO DEL ESTUDIO 56
5.2.3 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN *59*

6. CONCLUSIONES **83**

APENDICE A: CONCEPTOS Y PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE REFRACCIÓN SÍSMICA **85**

APENDICE B: VELOCIDAD SÍSMICA 90

BIBLIOGRAFÍA 92

RESUMEN

El presente trabajo de tesis muestra las secciones sísmicas obtenidas a partir de la adquisición y procesamiento de datos empleando el método de tomografía de refracción sísmica, con el objetivo de caracterizar fallas y estructuras arqueológicas someras localizadas a menos de 10 m de profundidad. Los datos sísmicos corresponden a dos casos de estudio: el primero refiere a estructuras arqueológicas y paleontológicas del poblado de San Miguel Tocuila, Estado de México; el segundo caso trata de las fallas asociadas a la actividad tectónica, a la subsidencia y al efecto de exceso de extracción de agua del subsuelo en la Ciudad de Morelia, Michoacán.

Los levantamientos consistieron en perfiles sísmicos, los cuales se orientaron sobre las superficies de interés de acuerdo con la geometría y posible disposición espacial de las estructuras a explorar. El espaciamiento entre geófonos de los perfiles fue de 1 a 2 m y de longitud total variable de acuerdo con el caso de estudio. Los sismogramas obtenidos durante las campañas de exploración fueron procesados con el programa SeisImager v2.0 y en concreto con ayuda de los módulos de Pickwin y Plotrefa.

Los resultados obtenidos aplicando el método de tomografía de refracción sísmica en el caso de estudio de San Miguel Tocuila permitieron identificar y caracterizar dos estructuras arqueológicas en forma de tlatel, también de acuerdo con la geometría conocida del depósito paleontológico ubicado dentro del museo de Tocuila, se pudo identificar un segundo sitio con dimensiones y geometría muy similares, lo cual abre la posibilidad de que en este sitio también existan restos fósiles de megafauna.

Asimismo, los resultados obtenidos referentes al caso de estudio de la Ciudad de Morelia reflejan claramente la geometría de las fallas “La Colina” y “Torremolinos” en

los distintos sitios donde se llevaron a cabo los estudios de prospección sísmica, permitiéndonos determinar características geométricas tales como tipo de falla, salto, rumbo y buzamiento.

En ambos casos de estudio los resultados expuestos han demostrado que el método de tomografía de refracción sísmica posee una gran aplicabilidad y potencialidad para coadyuvar en la solución de problemas de administración y uso de suelo, ya que se muestra como una técnica que ofrece resultados rápidos y precisos necesarios en estudios de geología y geotecnia, así como en disciplinas como la arqueología donde los resultados muestran que el método es de gran ayuda en la identificación de estructuras regulares que tienen un fuerte contraste con el medio circundante, tales como las estructuras prehispánicas.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en las ciudades de Morelia y México así como en gran parte de la zona metropolitana perteneciente al Estado de México se logran apreciar una gran cantidad de sitios en donde se observan irregularidades sobre la superficie del terreno. Esto puede estar asociado a la existencia de sitios arqueológicos y/o a procesos de subsidencia.

En los dos casos de estudio que se presentan en esta tesis se ha planteado la aplicación del método geofísico de tomografía de refracción sísmica, como una de las principales herramientas de exploración, para coadyuvar a la planificación urbana en zonas afectadas por subsidencia y en aquellas en las que existen evidencias de sitios arqueológicos y así contribuir en la identificación de posibles zonas de riesgo.

La aplicación de métodos geofísicos en este tipo de estudios es muy variada y los resultados obtenidos han justificado su aplicación sobre todo en el caso de los métodos eléctricos y de Radar de Penetración, sin embargo estos métodos no son infalibles ya que existen condiciones y fuentes de ruido que hacen que su aplicación sea limitada por ejemplo si el medio se encuentra saturado de agua o si existen líneas y redes de conducción eléctrica en el área de estudio.

Entre los métodos geofísicos el uso de la tomografía de refracción sísmica tiene una gran aplicabilidad y alcance en sitios donde los métodos eléctricos y de radar fallan, ya que por ejemplo en un medio saturado de agua la energía no se dispersa como en el caso del radar de penetración, permitiéndonos alcanzar la profundidad de los objetivos a explorar, mientras que en áreas de estudio donde existen líneas y redes de conducción

eléctrica los instrumentos utilizados y parámetros medidos se muestran menos sensibles a esta fuente de ruido. Logísticamente este método también ofrece grandes ventajas, en comparación con los métodos geofísicos antes mencionados, ya que permite cubrir grandes áreas de estudio rápidamente y a un costo comparativamente bajo, además los tiempos de adquisición y procesamiento son relativamente cortos, lo cual es una gran ventaja ya que problemas como la subsidencia requieren de resultados e interpretaciones rápidas, precisas y confiables con lo que el método de tomografía de refracción sísmica puede considerarse como fundamental en este tipo de estudios.

En este trabajo se describe y ejemplifica la aplicación del método de tomografía de refracción sísmica en la problemática asociada a las irregularidades del terreno. Se presentan dos casos de estudio; uno corresponde al estudio de estructuras arqueológicas en San Miguel Tocuila, Estado de México y el otro se refiere a la caracterización de fallas geológicas asociadas con procesos de extracción de agua y hundimientos en la Ciudad de Morelia, Michoacán.

1.1 SAN MIGUEL TOCUILA, ESTADO DE MÉXICO

Es conocido por los mexicanos que la cuenca del valle de México antes de la llega de los españoles se encontraba habitada por grandes civilizaciones prehispánicas que se establecieron y desarrollaron dentro y a las orillas del lago de Texcoco, ya que la gran densidad de zonas arqueológicas dentro de los márgenes del lago indican un prolongado e intenso impacto en la región por parte de estas culturas. Muchas de sus construcciones lejos de ser destruidas o sepultadas durante el periodo de la conquista y durante la colonia quedaron olvidadas en los alrededores de las nuevas ciudades, en donde la naturaleza se encargaría de sepultarlas y cubrirlas de vegetación. En la actualidad, el desmesurado crecimiento de la macha urbana ha puesto en peligro el patrimonio arqueológico en el

Estado de México, lo cual significa el deterioro o la perdida del patrimonio cultural de los mexicanos (Arciniega et al., 2008). A esto se suma que las estructuras prehispánicas enterradas y desconocidas pueden llegar a afectar el comportamiento de las estructuras modernas, debido a la interacción entre el suelo y la estructura (Barba, 2003).

En el área de estudio de San Miguel Tocuila existe una gran densidad de sitios arqueológicos en los que se han localizado tanto estructuras prehispánicas como depósitos paleontológicos, la ubicación de estos sitios contribuye en gran medida al enriquecimiento cultural de México y a una mejor comprensión de la historia natural del territorio mexicano. Debido a estas razones se llevaron a cabo estudios de prospección sísmica en el área de Tocuila con el objetivo de localizar mas sitios arqueológicos en el área.

1.2 CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN

En ciudades como Aguascalientes, Celaya, Morelia y Querétaro, la extracción acelerada de agua ha ocasionado asentamientos del terreno y la formación de grietas y fallas en la zona urbana. En estos casos, los asentamientos siguen los patrones de las fallas definidas por la tectónica regional. Las fallas, fracturas y grietas geológicas son rasgos morfológicos de gran impacto social debido a su potencial efecto destructivo que pueden tener sobre la infraestructura física y económica de la región (Mata-Segura et al., 2009).

Los daños provocados por estas estructuras geológicas a edificios y casas habitación, llegan a causar “perdida total” de las construcciones, ya que se rompen paredes y pisos, y en algunos casos se colapsan los techos. Esto como resultado de los esfuerzos a que son sometidas las estructuras debilitando las trabes y cimentaciones. Los afectados realizan continuas y costosas reparaciones, sin saber que el proceso no se detendrá. Finalmente, la

perdida del patrimonio afecta la calidad de vida de las personas y crea un problema social (Rodríguez-Castillo et al., 2006).

La subsidencia no solo afecta la infraestructura visible sino también las tuberías de agua potable, drenajes y poliductos. El rompimiento de tuberías de agua potable incorpora rápidamente cloro residual a través del fracturamiento del terreno ocasionando la contaminación del acuífero. Los drenajes rotos igualmente contaminan el acuífero incorporando microorganismos y materia orgánica. Además cuando las fallas interceptan poliductos se pueden producir derrames de hidrocarburos en el subsuelo (Rodríguez-Castillo et al., 2006).

Sin lugar a dudas la mejor acción preventiva contra este tipo de fenómenos es una mejor planificación urbana por parte de las autoridades correspondientes, que incorpore estudios multidisciplinarios en el área de exploración, diseño y construcción así como también de una mejor planificación en la extracción del agua, que garantice un desarrollo urbano seguro y no ponga en riesgo a la sociedad ni a sus recursos económicos.

La ciudad de Morelia es una de las más afectadas por el fenómeno de subsidencia, ya que este fenómeno ha propiciado la formación de una gran cantidad de grietas y fallas geológicas a lo largo de la ciudad, las cuales afectan gravemente la infraestructura desarrollada en la ciudad. Con el objetivo de caracterizar y determinar el área de influencia de las fallas “La Colina” y “Torremolinos” se realizaron estudios de prospección sísmica en distintos sitios ubicados a lo largo de las trazas de las fallas.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es presentar los resultados obtenidos a partir del uso del método de tomografía de refracción sísmica que demuestren la aplicabilidad y potencialidad del método de refracción sísmica para coadyuvar en la solución de problemas de administración y planificación de uso de suelo en zonas urbanas en donde se tienen evidencias de sitios arqueológicos y problemas de subsidencias.

Los objetivos específicos planteados a partir del estudio de tomografía de refracción sísmica en los dos casos de estudio son:

- Identificar estructuras arqueológicas en el área de estudio de San Miguel Tocuila y delimitar su geometría en el subsuelo.

- A partir de la geometría conocida del depósito paleontológico de Tocuila, contribuir en la identificación de más sitios con posibles restos fósiles de megafauna.

- Determinar y documentar las características geométricas de las fallas "La Colina" y "Torremolinos", tales como el tipo de falla, salto, rumbo y buzamiento.

- Determinar el área de influencia tanto lateralmente como a profundidad de las fallas estudiadas.

2. MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

2.1 MÉTODOS SÍSMICOS

La exploración sísmica es una de las técnicas más usadas en los métodos geofísicos de exploración ya que en combinación con otros datos geofísicos, estudios geológicos y de pozos de sondeo, proporciona información precisa sobre la estructura y distribución de diversos tipos de rocas en el subsuelo (Sheriff, 1995). En la exploración sísmica existen los métodos de refracción y reflexión sísmica, que son los utilizados en la ingeniería petrolera, los más conocidos y de mayor difusión (Ruiz et al., 1993).

La técnica básica de exploración sísmica consiste en generar ondas sísmicas a partir de una fuente móvil y controlada, estas ondas viajan a través de los distintos medios que componen el subsuelo en donde son reflejadas y refractadas hacia la superficie (Reynolds, 1997). El movimiento debido a la propagación de las ondas, es detectado por un arreglo de geófonos colocados sobre la superficie (Sheriff, 1995). Los geófonos convierten el movimiento en diferencias de voltaje las cuales son almacenadas por instrumentos electrónicos especializados como los sismógrafos (Gandallah, 2009). En general existen tres tipos de fuentes: las de impacto como son los martillos o la caída de objetos pesados; las impulsivas, dentro de las cuales se encuentran los explosivos y las pistolas de aire, y las fuentes vibratorias, como lo son los camiones vibroseis (Reynolds, 1997) la selección de la fuente apropiada para un estudio depende principalmente de los objetivos a explorar y la profundidad de interés.

El tiempo transcurrido entre el instante en que la fuente fue disparada y la llegada de los primeros arribos, de las ondas P y S hasta los detectores, es utilizado para determinar

la naturaleza de las distintas capas que componen el subsuelo (Reynolds, 1997) ya que este tiempo de viaje depende de las propiedades de las rocas y de la posición de las capas (Sheriff, 1995). Un sofisticado almacenamiento y un subsecuente procesamiento de los datos permiten realizar un análisis detallado de la amplitud, frecuencia y formas de onda sísmica. La información obtenida a partir de este análisis es usada para desarrollar imágenes de las estructuras del subsuelo y conocer las propiedades físicas de los materiales presentes en las distintas capas (Reynolds, 1997).

En la actualidad, las computadoras con gran velocidad en el manejo de información, capacidad de memoria y almacenamiento de datos, realizan procesos que en décadas anteriores sólo se lograban en sistemas muy grandes y costosos; este mismo desarrollo ha posibilitado la fabricación de equipo de medición con características y precios que permiten su uso en gran variedad de disciplinas con recursos limitados para la exploración, tales como, la Ingeniería Civil, la Geotecnia, la Hidrogeología, la Arqueología y la Geotermia (Ruiz et al., 1993).

2.1.1 MÉTODO DE REFRACCIÓN

El método de refracción sísmica está basado en las trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas sísmicas al propagarse desde un punto de la superficie, en donde son generadas, hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo y de estos hasta otro punto, ubicado en la superficie, en donde las señales son detectadas por una serie de sensores o geófonos, distribuidos usualmente a lo largo de una línea recta orientada hacia la fuente (Figura 2.1). Dichas señales son transmitidas por un cable hasta el sismógrafo, que amplifica, filtra y registra las señales de manera digital en un sismograma (Ruiz et al., 1993).

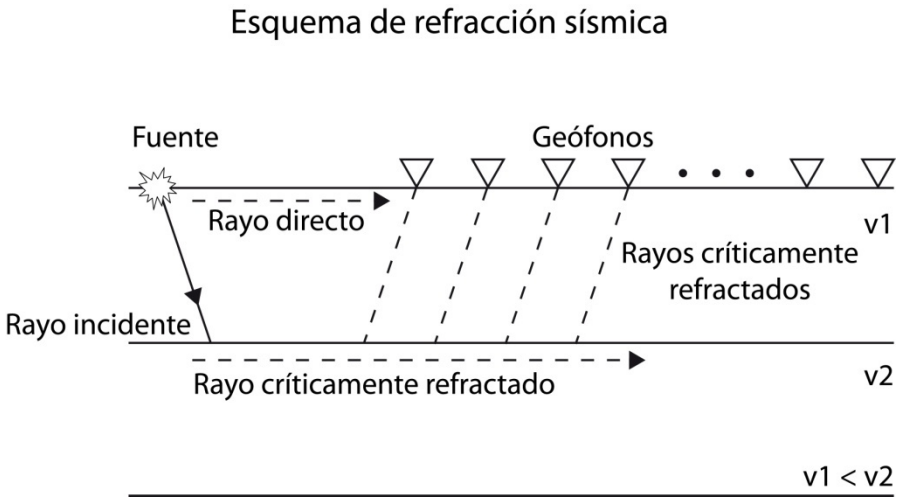

Figura 2.1- Geometría de las trayectorias tomadas por los frentes de onda directo y refractado a través de un medio estratificado, durante un estudio de refracción sísmica (Modificada de Reynolds, 2002).

A partir de la observación, procesamiento y análisis de los sismogramas es posible construir graficas de tiempo-distancia, mismas que mediante el análisis y procesamiento adecuados permiten determinar el número de capas en el subsuelo, sus espesores, geometría de la superficie refractante y velocidad de propagación a través de los distintos medios.

Actualmente el método ha encontrado una gran variedad de aplicaciones en la exploración de objetivos someros como por ejemplo en la detección de túneles y cavidades, determinación de los niveles freáticos y módulos de elasticidad del suelo y de la roca. Sin embargo el método aun se utiliza en la exploración petrolera para determinar la velocidad de la capa intemperizada, la profundidad de los estratos así como del basamento.

2.1.2 MÉTODO DE REFLEXIÓN

El método de reflexión sísmica consiste en medir los tiempos de viaje de las ondas sísmicas al propagarse desde la fuente hasta los contactos y estructuras geológicas localizadas en el subsuelo, donde parte de la energía se refleja a la superficie y es detectada por un arreglo de geófonos equiespaciados (Figura 2.2). En función de estos tiempos y distancias se obtienen secciones del subsuelo que muestran la secuencia estructural de las distintas formaciones que componen el subsuelo del área explorada. Las reflexiones ocurren cuando existen contrastes de densidad y por lo tanto de velocidad entre las capas que son atravesadas por las ondas (Cantos, 1972).

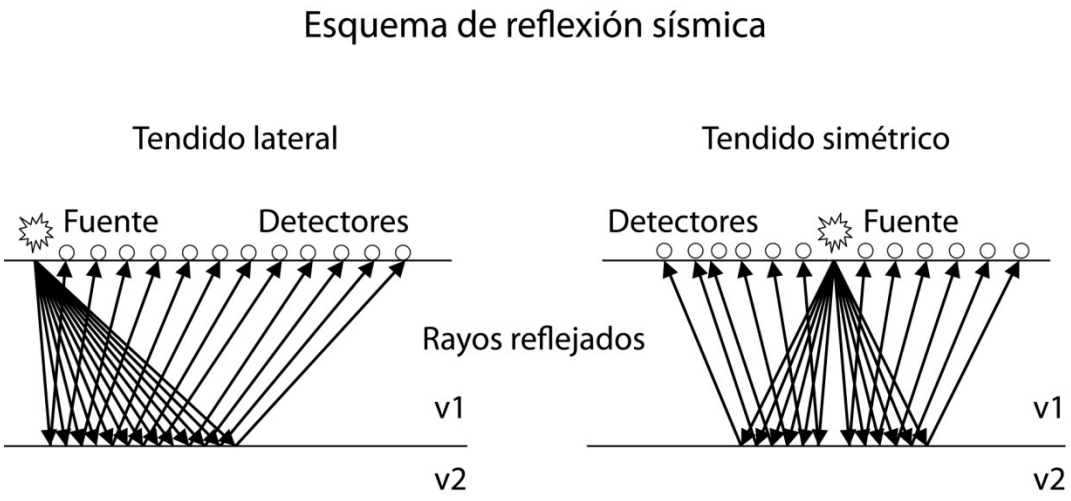

Figura 2.2- Geometría de la trayectoria tomada por el frente de onda reflejado a través de un medio estratificado, durante un estudio de reflexión sísmica (Modificada de del Valle, 2008).

Su principal campo de aplicación se encuentra en la exploración petrolera ya que al igual que el método de refracción permite determinar las condiciones estructurales, el espesor y la profundidad de los estratos, sin embargo la profundidad de investigación es mucho mayor en comparación con la distancia que hay entre la fuente y el arreglo de sismodetectores (Bell, 2007).

2.2 MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Existen varios métodos para interpretar las curvas de tiempo-distancia en términos del número de capas, velocidades, espesores y posición estructural. Sin embargo, solo cuatro de estos métodos son los más utilizados en la práctica de la exploración sísmica al emplear el método de refracción, los cuales se describen a continuación:

Método de Tiempos de Intersección

En este método se consideran principalmente dos modelos: el estratificado horizontal y el estratificado con contactos inclinados. En el primer caso, las velocidades se obtienen directamente de los inversos de las pendientes de la curva tiempo-distancia y utilizando las intersecciones de las prolongaciones de estas rectas con el eje del tiempo, mientras que el cálculo de los espesores se realiza con formulas ya establecidas para este método (Redpath, 1973).

Cuando los contactos entre las capas son inclinados el cálculo de velocidades y espesores es más elaborado, ya que los parámetros que se obtienen con el análisis de las curvas de tiempo-distancia son aparentes, por lo que las velocidades reales de las capas deben ser calculadas al igual que los espesores y el ángulo del echado o inclinación, también se obtienen mediante formulas ya establecidas (Redpath, 1973).

Método de Tiempo de Retraso

Cuando los contactos entre las capas son irregulares, este método posibilita el cálculo de la profundidad del contacto bajo cada geófono. Para efectuar el cálculo mediante las formulas ya establecidas es necesario: el conocimiento del tiempo total de viaje entre cada

una de las fuentes y el geófono mas lejano (tiempo reciproco), los tiempos de arribo de ambas señales a cada geófono y las velocidades reales calculadas con cualquier método, por ejemplo, el de tiempo de intersección (Redpath, 1973).

Método Reciproco generalizado (GRM)

La aplicación de este método permite el análisis de la forma de las curvas tiempo-distancia para los cálculos de velocidades, espesores, forma de los contactos e inclusive cambios laterales en la velocidad de las capas refractoras (Ruiz et al., 1993). De acuerdo con Palmer D. (1980), se calculan dos funciones para cada refractor, reconocible en las curvas tiempo-distancia: la función de análisis de velocidad y la función tiempo-profundidad, de las cuales se puede obtener la sección que muestra la distribución de las velocidades en las diferentes capas que componen el subsuelo y su profundidad.

Método de Trazado de Rayos

Este método parte de la suposición de un modelo específico y se calculan las trayectorias que debe seguir el movimiento ondulatorio desde el punto en donde se disparó la fuente hasta cada uno de los geófonos. Con esto se establecen los tiempos de viaje de los primeros arribos para cada refractor en cada uno de los geófonos. Seleccionando de todo el conjunto los de tiempo mínimo, se construye una curva tiempo-distancia, que es comparada con la curva tiempo-distancia obtenida en campo, cuantificando las diferencias y haciendo los ajustes necesarios en el modelo para minimizar el error; el trazado de rayos permite simular un gran numero de modelos como fallas, grabens, horst, etc. (Ruiz et al., 1993).

2.3 TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA

El termino tomografía fue usado primero en el campo de la medicina para realizar imágenes de tejido humano usando Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y otras mediciones físicas. En el área de la exploración sísmica se ha utilizado para la reconstrucción del campo de velocidades del subsuelo mediante el análisis de los tiempos de viaje medidos (Russell, 1988). Sin embargo, el método de imágenes sísmicas fue desarrollado independientemente del utilizado por la comunidad médica, y de hecho se llamaba originalmente "inversión 3-D" método utilizado por la comunidad sismológica hasta principios de los años 80's, cuando los técnicas algebraicas de matriz iterativa usadas en la tomografía medica fueron introducidas en el campo de la geofísica.

Los métodos de inversión los cuales en general se pueden denominar como técnicas de reconstrucción de tomografía han encontrado varias aplicaciones en el campo de la exploración sísmica (White, 1988). La aplicación más común de estas técnicas ha sido la inversión de la velocidad usando los tiempos de viaje empleados por los rayos sísmicos, obtenidos a partir de mediciones de pozo a pozo o de pozo a superficie (White, 1988).

El método de inversión de tomografía se utiliza para conocer los contrastes de velocidad de una forma gradual (Worthington et al., 1983), o cuando se requiere conocer las variaciones de velocidad horizontales por ejemplo en áreas de compactación, zona de fallas o karst (Sheehan et al., 2005) y en condiciones en las cuales la topografía debido a su complejidad dificulta la interpretación. Esta técnica también puede ser utilizada para aumentar la resolución de estructuras localizadas bajo el subsuelo e incrementar la resolución de la velocidad de dichas estructuras, proporcionándonos en ambos casos imágenes en dos y tres dimensiones (Pisanu et al., 2009).

Existen varias técnicas que permiten realizar la reconstrucción de tomografía, tales como la *técnica de reconstrucción algebraica (ART)* por sus siglas en inglés y la *técnica de reconstrucción simultanea (SIRT)* también por sus siglas en inglés (Kearey, 2002), ambas son utilizadas comúnmente para realizar la inversión de la velocidad usando los tiempos de viaje empleados por los rayos sísmicos al atravesar las distintas unidades geológicas que componen el subsuelo. En esta tesis se utilizó la inversión de tomografía no lineal junto con la técnica de reconstrucción simultanea (SIRT), las cuales se encuentra incluidas dentro del software SeisImager v2.0 (Hayashi et al., 2001; Sheehan et al., 2005), software que se utilizó para procesar y modelar los datos sísmicos adquiridos en los casos de estudio de Morelia y Tocuila mediante el método de tomografía de refracción sísmica.

El método de tomografía de refracción sísmica involucra la creación de un modelo de velocidad inicial, e iterativamente rastrea los rayos a través del modelo, mediante la técnica de reconstrucción simultanea iterativa, comparando el tiempo de viaje calculado con el tiempo de viaje observado, modificando el modelo, y repitiendo el proceso hasta que la diferencia entre los tiempos calculados y observados se minimiza (Mason, 1981) mediante el criterio de error RMSE (Root Mean Square Error) el cual es una medición frecuentemente usada en el cálculo de las diferencia entre valores predichos por un modelo y los valores en realidad observados del parámetro o propiedad física que está siendo modelada o estimada, estas diferencias individuales también son llamadas residuales.

El objetivo principal de la técnica de reconstrucción incluida en el software Seisimager/2D v2.0 es encontrar el tiempo de viaje mínimo entre la fuente y el receptor para cada par fuente-receptor (Figura 2.2). Esto se logra resolviendo el sistema de ecuaciones para l (el patrón de rayos) y para s (la velocidad inversa o "lentitud"). Dado que nosotros no conocemos la geometría del subsuelo se establece un método de aproximación por mínimos cuadrados.

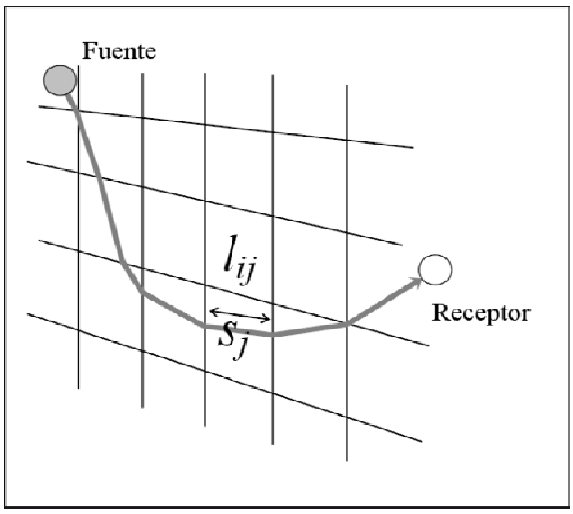

Figura 2.2- Tomografía de tiempos de viaje y la trayectoria de rayo entre la fuente y el receptor (Modificada del manual de SeisImeger/ 2D v3.1).

A continuación se describe de manera general el desarrollo matemático mediante el cual se obtiene el vector solución de los tiempos de viaje, en la inversión de tomografía de refracción sísmica mediante la cual se elaboran los modelos de capas.

Si definimos:

En donde:

s = "lentitud"
v = "velocidad"
l_{ij} = "trayectoria"

El tiempo de viaje se calcularía a partir de una integral de línea como:

$$t_i = \int_X \frac{dX}{v(X)} = \int_X s(X)dX$$

En su forma discreta:

$$t_i = s_1 l_{i1} + s_2 l_{i2} + s_3 l_{i3} + s_4 l_{i4} + \ldots + s_N l_{iN} \qquad \text{ó} \qquad t_i = \sum_{j=1}^{N} s_j l_{ij}$$

Si finalmente separamos en M ecuaciones simultáneas (una para cada tiempo de viaje) y N incógnitas, obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$t_1 = l_{11} s_1 + l_{12} s_2 + \ldots + l_{1N} s_N$$
$$t_2 = l_{21} s_1 + l_{22} s_2 + \ldots + l_{2N} s_N$$
$$t_3 = l_{31} s_1 + l_{32} s_2 + \ldots + l_{3N} s_N$$
$$\vdots$$
$$t_N = l_{M1} s_1 + l_{M2} s_2 + \ldots + l_{MN} s_N$$

El cual en su forma matricial queda representado de la siguiente manera:

$$LS = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & . & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & . & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & . & l_{3N} \\ . & . & . & . \\ l_{M1} & l_{M2} & . & l_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ . \\ s_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ . \\ t_N \end{bmatrix} = T$$

Trayectoria de Viaje *Modelo* *Tiempo*

Finalmente se obtiene la ecuación aproximada para el cálculo de los tiempos de viaje, en donde el primer término está representado por el parámetro de rayos que multiplica al modelo dando como resultado la matriz unidimensional de los tiempos.

3. ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En este capítulo se describen de manera general los trabajos de campo y de gabinete realizados durante las campañas de prospección sísmica en las localidades de San Miguel Tocuila, Estado de México y la Cd. de Morelia, Michoacán.

3.1 TRABAJO DE CAMPO

Los datos de refracción sísmica en los sitios de estudio de San Miguel Tocuila y la Ciudad de Morelia fueron adquiridos utilizando un sismógrafo de 48 canales, modelo StrataVizor NZ II de la marca Geometrics (Figura 3.1), 24 geófonos verticales de 14 Hz, de la marca OYO Geospace, un martillo de 8 Kg, cableado y equipo menor.

Figura 3.1- Sismógrafo Geometrics, modelo StrataVizor NZII y su sistema de registro.

La técnica de campo empleada durante los estudios de tomografía de refracción sísmica, consistió en el diseño de perfiles sísmicos según la Figura 3.2. En el caso de estudio de San Miguel Tocuila los perfiles se orientaron sobre las superficies de acuerdo con la posible geometría y distribución espacial de las estructuras geológicas y arqueológicas enterradas. En el caso de estudio de la Ciudad de Morelia los perfiles se orientaron perpendicularmente siguiendo la extensión de los cambios morfológicos en superficie de las distintas fallas exploradas. En general, se uso en todos los perfiles un espaciamiento entre geófonos de 1 a 2 m, con longitud variable según las condiciones del terreno (vegetación, accesibilidad, tipo de suelo, etc.) y la profundidad de los objetivos a localizar.

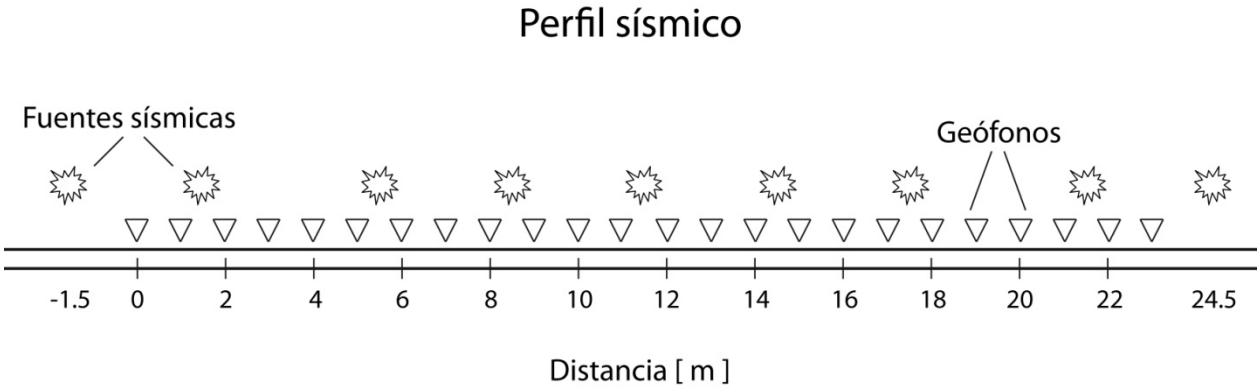

Figura 3.2- Diseño de los perfiles sísmicos utilizados en los casos de estudio de San Miguel Tocuila y la Cd. de Morelia.

El primer paso en el proceso de adquisición sísmica, en cada uno de los perfiles, consistió en ubicar la posición adecuada del perfil, se tomaba su orientación geográfica con ayuda de un GPS y posteriormente se colocaban sobre el terreno el cable de sísmico y los geófonos, los cuales se acoplaban la superficie y se conectaban al cable sísmico. De acuerdo con las condiciones del terreno se manejaron dos tipos de geófonos, en los sitios en donde aún se cuenta con suelos expuestos se utilizo el geófono común de aguja como lo es en el poblado de San Miguel Tocuila, mientras que en sitios pavimentados como es

el caso de las calles de la Ciudad de Morelia, se utilizó un geófono acondicionado con un platillo. Para acoplar mejor el geófono al terreno se uso una bolsa de arena con el objetivo de disminuir la vibración del geófono en el momento del impacto en cada una de las fuentes a lo largo del perfil (Figura 3.3).

Figura 3.3- Acoplamiento de geófonos sobre el pavimento durante la adquisición de datos en la Ciudad de Morelia (Tomada de Arciniega, 2008).

El segundo paso en la adquisición sísmica, consistió en conectar el cable sísmico y el hammer switch al sismógrafo. Se revisaba que el hammer switch funcionara de manera adecuada, realizando un pequeño impacto sobre el terreno y corroborando en la pantalla del sismógrafo que cada una de las trazas de los geófonos registraran actividad de manera adecuada, una vez terminada dicha prueba se procedió a realizar la adquisición de datos en cada uno de los perfiles sísmicos realizados en los casos de estudio presentados en esta tesis.

La fuente utilizada para generar de manera puntual la energía sísmica consistió en un martillo de 8 Kg, el cual se hizo incidir de manera vertical sobre una placa de acero acoplada al terreno. Se apilaron cinco impactos en cada una de las fuentes establecidas a lo largo de los perfiles sísmicos realizados en la localidad de San Miguel Tocuila,

mientras que en los perfiles realizados en la Cd. de Morelia se apilaron en algunos perfiles cuatro impactos y en otros cinco, esto con el propósito de mejorar la calidad de los datos en ambos casos de estudio, ya que se elimina el ruido aleatorio y se suma la señal coherente.

Independientemente de la técnica utilizada para interpretar los datos, las múltiples fuentes a lo largo de los perfiles medidos permitieron una buena cobertura del subsuelo y mejorar la calidad en los datos obteniéndose así modelos más confiables.

3.2 TRABAJO DE GABINETE

En el procesamiento de los sismogramas de cada una de las líneas sísmicas adquiridas durante los estudios de refracción sísmica se utilizó el paquete integral de computación SeisImager/2D^{TM}. Este programa consta de dos módulos, el primero se llama *Pick First Breaks or Dispersion Curves* (Pickwin^{TM}) que como su nombre lo indica se utiliza para marcar los primeros arribos, el segundo se llama *Refraction Análisis* (Plotrefa^{TM}) que es el programa de análisis principal, de modelado e interpretación, al final de este capítulo se presenta un diagrama de la secuencia de trabajo realizada con estos dos módulos (Figura 3.6).

3.2.1 MÓDULO DE PICKWIN

El objetivo principal de PickwinTM es ayudar a identificar los primeros arribos en cada una de las trazas de nuestros sismogramas (Figura 3.4), almacenarlos y guardarlos en un archivo para su posterior entrada al programa de análisis, PlotrefaTM. Este módulo contiene múltiples aplicaciones y comandos que permiten poner en marcha la fase inicial del procesamiento de datos sísmicos, tales como la disposición geométrica correcta del

tendido de adquisición, filtrado de las señales, disminución o aumento de la ganancia en la traza sísmica, etc.

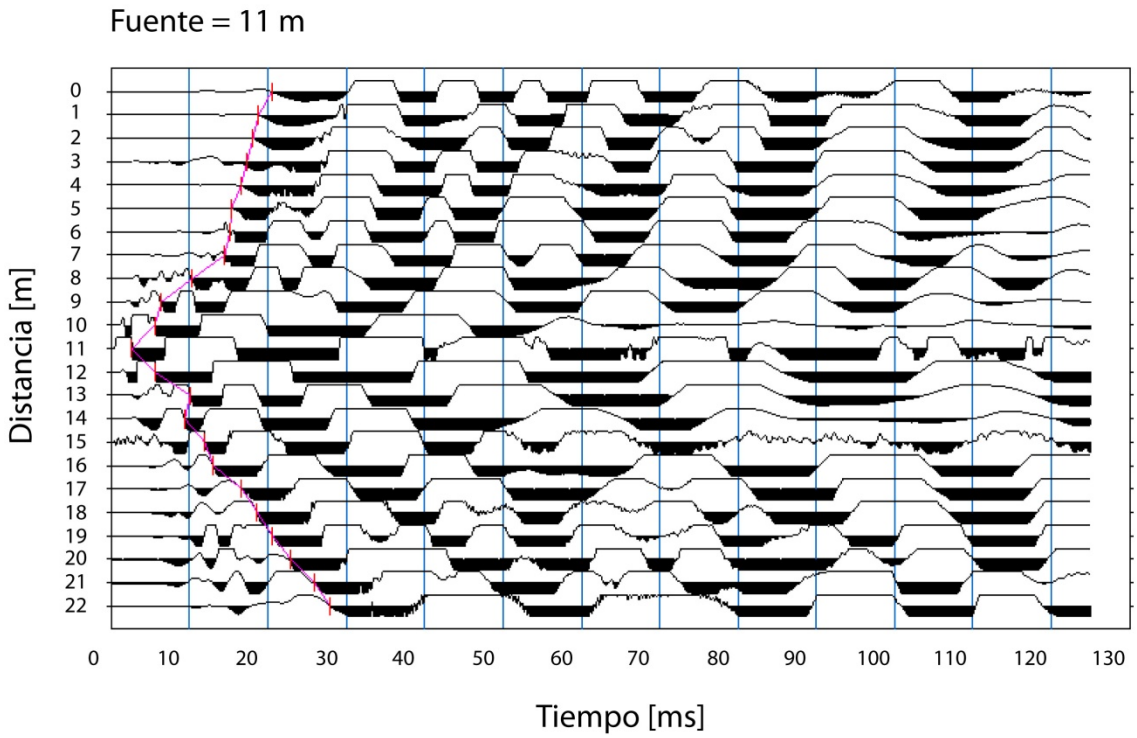

Figura 3.4- Ejemplo de un sismograma y la selección de los primeros arribos, obtenido en la localidad de Tres Puentes en la Ciudad de Morelia, Michoacán.

3.2.2 MÓDULO DE PLOTREFA

Plotrefa es el módulo de interpretación de SeisImager/2D^{TM}. Toma el archivo de salida de Pickwin^{TM}, y mediante la aplicación de una de las siguientes técnicas de interpretación: Time- term por mínimos cuadrados, Tiempo de retraso (recíproco) o inversión de tomografía se genera una sección transversal de velocidades.

En este módulo se lleva a cabo el análisis de las curvas de Distancia- Tiempo de viaje, es decir, se hace la asignación de capas sobre las curvas, con sus respectivas velocidades (Figura 3.5); posteriormente se aplican el método de inversión de tomografía, el cual

genera un modelo inicial que contiene los parámetros de velocidad máxima, velocidad mínima y elevación promedio de la superficie del modelo a generarse. Por último se aplica el cálculo de la inversión, con lo cual se genera un modelo de variaciones de velocidades mediante un gradiente suavizado, para así obtener un modelo de capas, según lo observado en las curvas de distancia-tiempo, del cual se extraen finalmente los datos de profundidad de cada horizonte o superficie refractora, correspondientes a la ubicación de cada geófono.

Gráfica tiempo-distancia

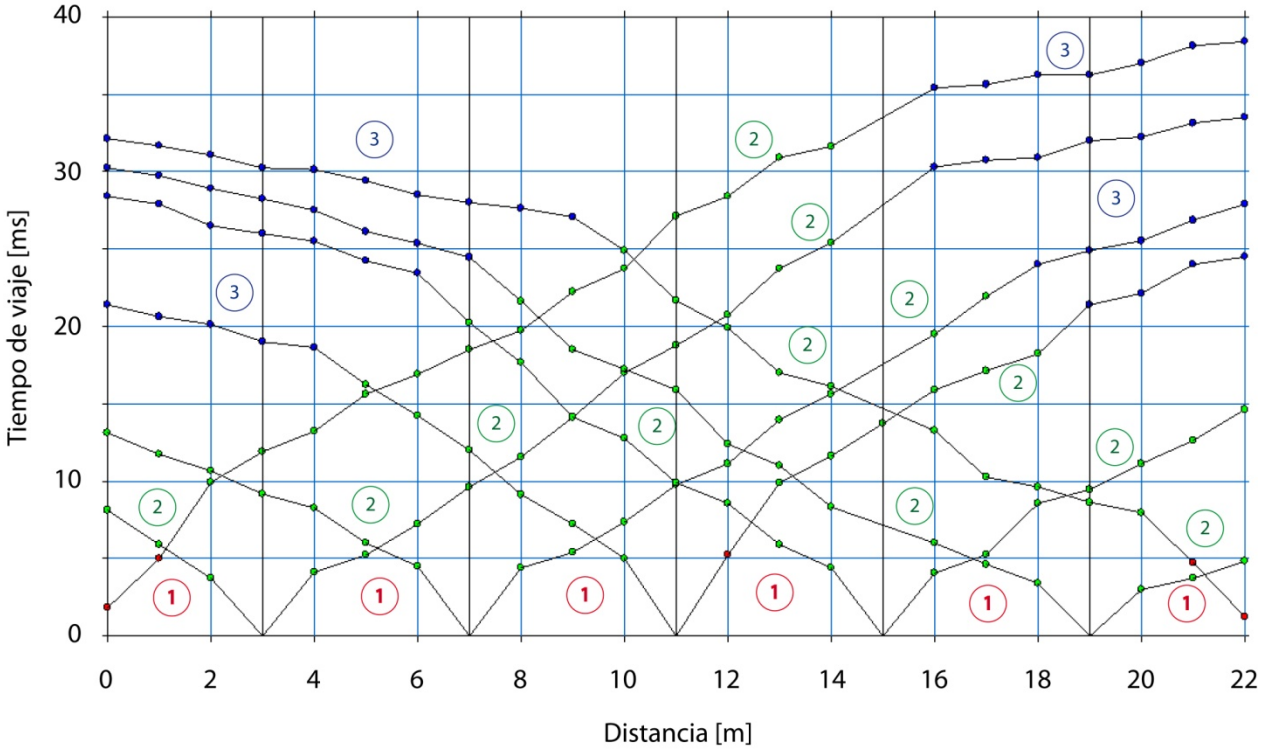

Figura 3.5- Ejemplo de una gráfica de tiempo-distancia y su asignación de capas para el perfil realizado en la calle de Ma. Molina en la Ciudad de Morelia Michoacán.

El análisis realizado con los módulos de Pickwin™ y Plotrefa™ se resume en el siguiente diagrama.

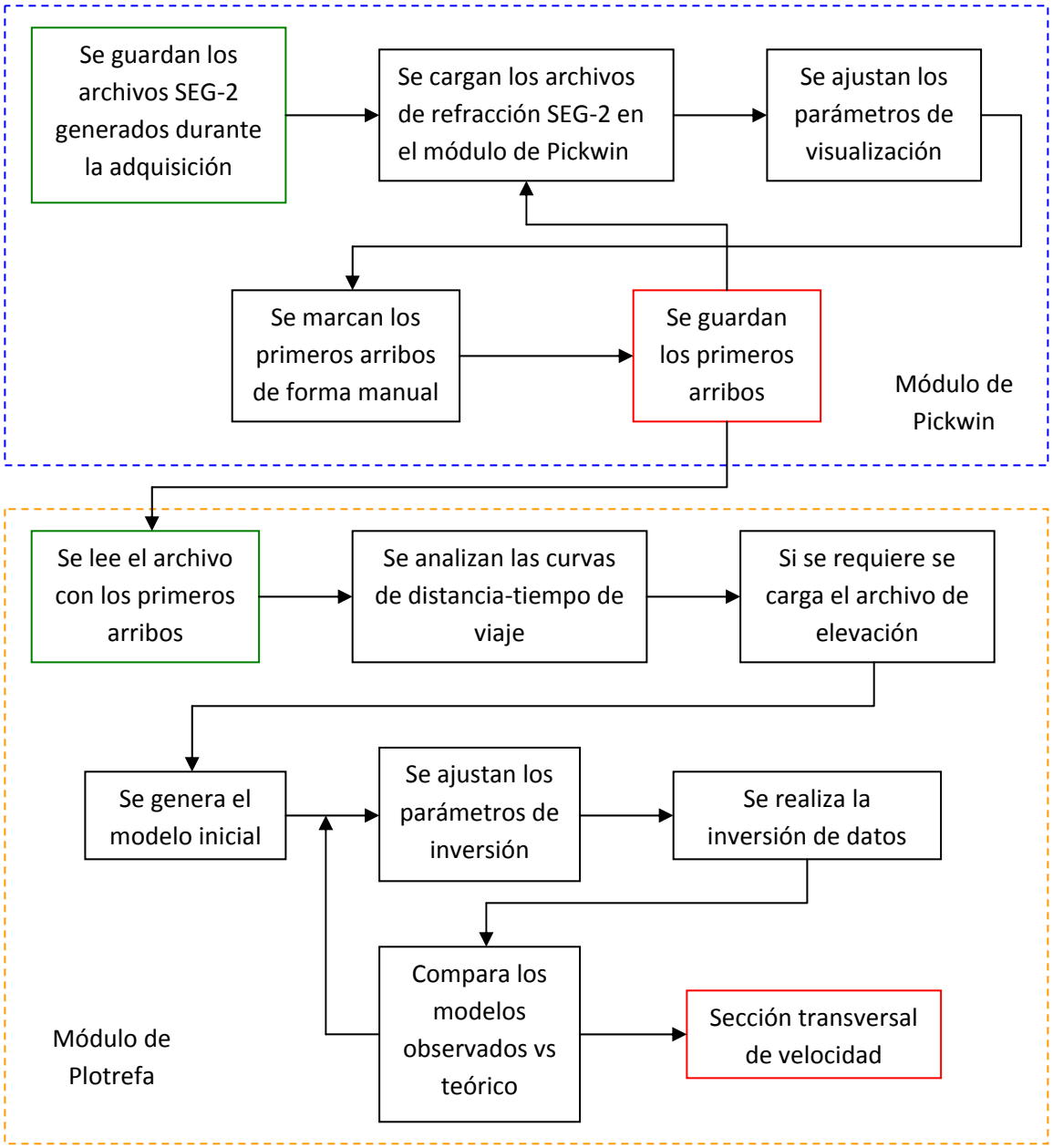

Figura 3.6. Secuencia de trabajo implementada durante el procesamiento, análisis y modelado de los datos de Tomografía de Refracción Sísmica.

4. CASO DE ESTUDIO SAN MIGUEL TOCUILA, ESTADO DE MÉXICO

En este capítulo se describe de forma general el marco geológico del área de estudio de San Miguel Tocuila, también se describe la importancia de este sitio tanto arqueológicamente como paleontológicamente. Finalmente se presentan los resultados, así como las interpretaciones realizadas de las secciones de velocidad sísmica, obtenidas a partir del uso del método de tomografía de refracción sísmica, durante la campaña de prospección geofísica realizada en el área de estudio con el objetivo de identificar estructuras arqueológicas y depósitos con posibles restos paleontológicos.

4. 1 GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE MÉXICO

4. 1. 1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La región de Texcoco se encuentra situada geográficamente en la parte este del Estado de México, dentro de la porción oriental de la Cuenca de México. El pueblo de San Miguel Tocuila pertenece al municipio de Texcoco de Mora en el Estado de México, se encuentra ubicado sobre lo que solía ser el margen este del antiguo lago de Texcoco entre la latitud 19° 31′ 22″ N y longitud 98° 54′ 46″ W (Figura 4.1), ligeramente debajo de la cota de los 2240 msnm. Esta zona se caracteriza por tener abundantes sitios arqueológicos y depósitos paleontológicos (Morett et al., 2001).

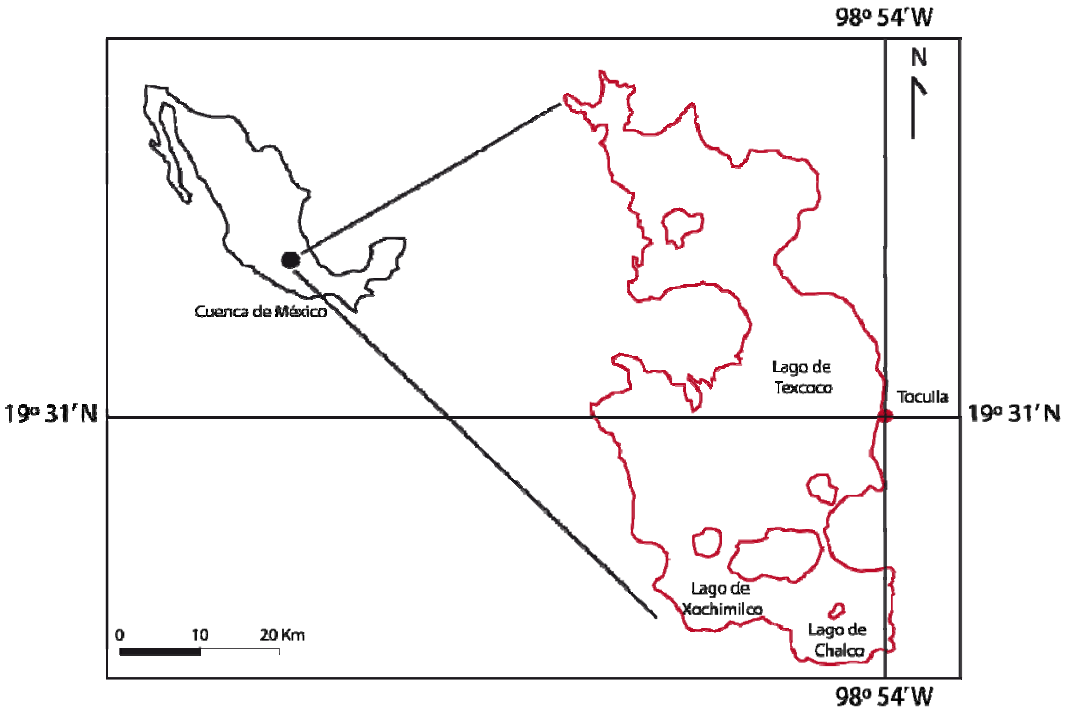

Figura 4.1- Ubicación del antiguo lago de Texcoco y el sitio arqueológico de San Miguel Tocuila (Modificado de Gonzáles et al., 2006).

4. 1. 2 GEOLOGÍA REGIONAL

La Cuenca del Valle de México (Figura 4.1) está situada en el centro de la faja volcánica que atraviesa a la República Mexicana de este a oeste. En general, la cuenca de México se encuentra limitada al sur por la Sierra Chichinautzin y la Sierra de Ajusco, al sureste y este por las estribaciones de la Sierra de las Cruces. Al norte está limitada por las Sierras de Pachuca y Tepotzotlán, así como también por los Cerros de Xalpa y Sincoque. Por el oeste delimitan a la cuenca de México las estribaciones de la Sierra Nevada, de la que forman parte los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl (Encino-De la Vega, 1979).

La cuenca ha estado sujeta a grandes esfuerzos tectónicos, así como a erupciones volcánicas ocurridas de principios del terciario hasta épocas recientes. Se trata de una extensa planicie elevada con altitudes de entre 2230 y 2250 msnm; rodeada por grandes cadenas montañas correspondientes al Terciario tardío y Cuaternario, en donde además gran parte de esta planicie se encuentra cubierta por sedimentos lacustres (Morales., et al 1989).

Estudios geológicos y geofísicos han mostrado que inicialmente se trataba de una cuenca abierta que drenaba hacia el sur, la cual se cerró después de 0.78- 0.79 Ma debido principalmente a la actividad volcánica dentro de la gama Chichinautzin (Lozano et al., 1997). Esta circunstancia permitió el relleno con materiales de acarreo y cenizas volcánicas transportados por aire o por corrientes de agua hacia las partes bajas formándose una gran planicie que fue ocupada por un extenso sistema de lagos someros, entre los cuales destaca el lago de Texcoco (Morales et al., 1989).

En general, en la cuenca de México, las descripciones litológicas que se conocen comprenden una amplia variedad de productos volcánicos, como aglomerados, derrames, lahares, surges, lapillis, brechas, ceniza volcánica, etc. La composición de estos materiales varía de riolítica, dacítica, andesítica, basáltica a combinaciones de estas familias de rocas (Encino-De la Vega, 1979).

Los sedimentos presentes en la cuenca son de origen volcánico y lacustre (arcillas, limos y horizontes arenosos), encontrándose en los márgenes de la cuenca sedimentos de ambos tipos interdigitizados, disminuyendo los primeros y aumentando los segundos hacia las partes centrales de la cuenca (Rodríguez et al., 1989). Se sabe también de la existencia de diatomita, turba y caliche asociados a depósitos lacustres (Encino-De la Vega, 1979).

4. 1. 3 GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE TEXCOCO

La cuenca de México se encuentra dividida superficialmente en once subcuencas (Xochimilco, Cuautitlan, Texcoco, Techac, Churubusco, Pachuca, Chalco, Tecomulco, Ciudad de México, Teotihuacan y Apan), siendo además compartida por cinco entidades federativas (los estados de Hidalgo, México, Tlaxcala, Puebla y el Distrito federal) (Encino-De la Vega, 1979; Morales et al., 1989).

La subcuenca de Texcoco corresponde a una planicie cubierta por arcillas lacustres con espesores de alrededor de 60 m, las cuales cubren a materiales aluviales del cuaternario. Bajo estos materiales se llegan a encontrar horizontes o capas de rocas ígneas del Terciario, que comprenden restos de estratovolcanes, tobas, brechas, derrames de lavas y depósitos laháricos, los cuales afloran en elevaciones topográficas que circundan al ex- Lago de Texcoco (Morales et al., 1989).

4. 2 MARCO ARQUEOLÓGICO Y PALEONTOLÓGICO

La localidad de Tocuila y en general toda la región circundante del ex- lago de Texcoco se caracteriza por ser abundante en sitios de depósitos paleontológicos y arqueológicos. En la zona se encuentran restos de actividad cultural que pertenecieron a los primeros grupos humanos que poblaron el continente americano, se han identificado herramientas y huesos tallados además de evidencias de intensa actividad agrícola y desarrollo urbano que perteneció a una amplia gama de culturas prehispánicas que se desarrollaron en las cercanías del lago de Texcoco.

Así mismo se han se han descubierto varios depósitos paleontológicos; Los restos de al menos siete mamuts fueron descubiertos en Julio de 1996, durante los trabajos de construcción de una cisterna de agua. Todos los mamuts fueron encontrados en un área que mide 30 m2, en una fosa de 5 x 6 m, a una profundidad de 3. 15 m (Figura 4.2), contenidos en una capa de flujo de lodo volcánico (lahar) que relleno completamente un pequeño canal de drenaje de un río con dirección SE- NO hacia el lago de Texcoco (Gonzáles et al., 2006). Otras especies identificadas dentro del mismo horizonte y asociadas a los mamuts son caballos, un camello, un bisonte, un felino y un conejo (Morett et al., 2001). Los restos de animales hallados en las excavaciones configuran el tipo de conjunto característico del Pleistoceno tardío para el centro de México hace poco más de diez mil años. Estas características hacen de San Miguel Tocuila uno de los sitios mas importantes de finales del cuaternario de la cuenca de México.

Figura 4.2- Restos de Mamuts localizados dentro de la cisterna excavada en julio de 1996, en la localidad de San Miguel Tocuila.

En el valle de México, antes de la llegada de los españoles, la técnica de construcción dominante para vivienda, centros ceremoniales y zonas de cultivo (como las chinampas) se basaban en la construcción de montículos, denominados tlateles (Arciniega et al., 2008). En general los montículos son nombrados según el uso que se les daba, que fundamentalmente era para defensa, como centros ceremoniales, como tumbas, para casas habitación o como zonas de cultivo (Arciniega et al., 2008). Es posible observar en gran parte del territorio mexicano estos montículos, los cuales pueden ser de muy diversos tamaños, todos ellos construidos en distintas épocas por pueblos prehispánicos; en donde quizá la mayor concentración de estos montículos se localiza en el centro del país (Noguera, 1975).

Por lo general tales elevaciones rompen con la uniformidad del paisaje, observándose claramente su origen artificial ya que estas se encuentran fuera del ámbito geológico y ecológico del lugar (Figura 4.3). Aun sobre las grandes elevaciones naturales, cerros o montañas, destacan estos montículos artificiales, que pueden corresponder a restos de construcciones o zonas de cultivo, sobre los cuales se han depositado grandes cantidades de tierra las cuales a su vez se ha cubierto con la vegetación característica de la región con el transcurso del tiempo (Noguera, 1975).

Figura 4.3- Tlatel ubicado en la región de Texcoco, Estado de México (Tomada de Parsons, 1971).

4. 3 ESTUDIO DE TOMOGRAFÍA DE REFRACCIÓN SÍSMICA

4. 3. 1 ESTUDIOS PREVIOS

Desde el descubrimiento del depósito paleontológico, en el año de 1996, se han realizado varios estudios de tipo arqueológico y paleontológico en el área de San Miguel Tocuila por Siebe et al. (1999), Morett- Alatorre et al. (1998, 2001), Arrollo- Cabrales et al. (2001, 2006), Gonzáles et al. (2006). Además de una gran cantidad de artículos que se han publicado de otras zonas cercanas a San Miguel Tocuila en las cuales se han localizado depósitos paleontológicos de megafauna en menor escala. El único antecedente de estudios de prospección geofísica publicado para el área de San Miguel Tocuila es el trabajo realizado por Arciniega et al. (2008), el cual presenta y compara resultados obtenidos a partir de la aplicación de los métodos geofísicos de Magnetometria, Tomografía de Refracción Sísmica y de Radar de Penetración.

Existen varias hipótesis para explicar la acumulación de restos fósiles en este sitio. En un principio se considero la posibilidad de que el desbocamiento de un antiguo rió que fluía con dirección al Lago de Texcoco, sorprendió, arrastró consigo, ahogó, y sepultó juntos a los mamuts y demás animales (Morett et al., 2001).

Investigaciones posteriores concuerdan en que fue un lahar el que sepultó a estos animales, no así en el origen de dicho lahar ya que los estudios presentados por Siebe et al. (1999) sugieren que este lahar tuvo su origen gracias a la actividad eruptiva del volcán Popocatepetl; mientras que estudios presentados por Gonzáles et al. (2006) suponen que este lahar tuvo su origen debido a la actividad del Nevado de Toluca.

Estratigrafía del depósito

La secuencia estratigráfica excavada, en esta que es una de las fosas más representativas de San Miguel Tocuila, consiste principalmente en depósitos vulcanoclásticos y suelos (Figura 4.4), a esta secuencia la caracterizan principalmente dos unidades, las cuales se describen de forma general a continuación:

Unidad inferior

El depósito de lahar consiste en dos unidades distinguibles del flujo, las cuales están separadas por una discontinuidad plana apenas visible. La unidad inferior tiene 130 cm. de espesor y cubre un delgado horizonte de suelo derivado de una ceniza arenosa de color oscuro. Esta unidad inferior es la que contiene los restos fósiles de mamut (Siebe et al., 1999).

Unidad superior

La unidad superior tiene 68 cm. de espesor y va cambiando gradualmente a un suelo de tipo paleosol. Ambas unidades de lahar son masivas, no gradadas y sin clasificar, consisten en gran parte de ceniza arenosa, lapilli y fragmentos de piedra pómez. Presentan clastos líticos de andesita menores a 3 cm de diámetro. Los clastos de piedra pómez son de color amarillo parduzco claro y no mayores a 4 cm. de diámetro. Aunque existan partes en las unidades que están endurecidas son frágiles cuando están secas (Siebe et al., 1999).

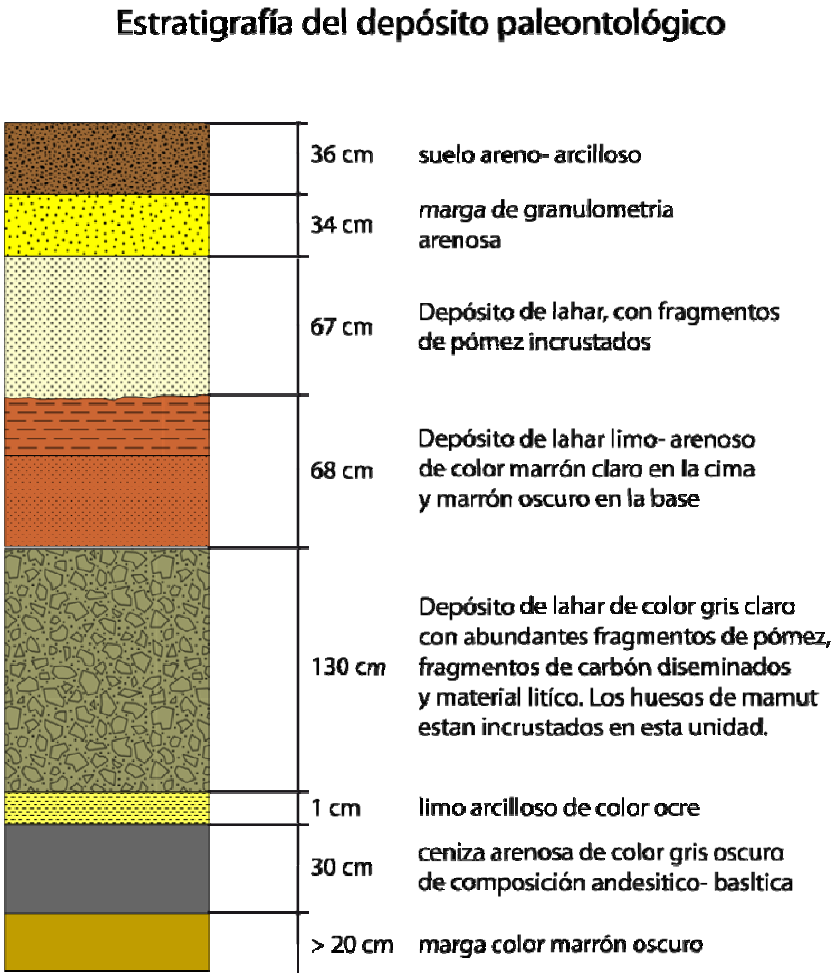

Figura 4.4- Columna estratigráfica de la cisterna excavada en el actual museo de Tocuila, describe las capas que componen el depósito paleontológico abundante en restos fósiles de mamut.

4. 3. 2 DISEÑO DEL ESTUDIO

En el área de San Miguel Tocuila se realizaron un total de 6 tendidos de refracción sísmica, a lo largo de distintas localidades cercanas al Museo Paleontológico de Tocuila (Figura 4.5). Estos tendidos se orientaron de acuerdo a la geometría y posible distribución en el subsuelo del depósito que contiene los restos fósiles de megafauna, de acuerdo con el arqueólogo Morett Alatorre (comunicación personal). Los perfiles sísmicos en su mayoría consistieron en dos líneas consecutivas de 12 geófonos con excepción del Perfil-2 el cual únicamente contó 12 geófonos, esto debido principalmente al proceso de urbanización en esta zona, el cual se caracteriza por la falta de planificación.

Figura 4.5 - Área de estudio y ubicación de los perfiles de refracción sísmica dentro del poblado de San Miguel Tocuila.

A continuación se presentan las características geométricas de los perfiles sísmicos realizados en los distintos en el poblado de San Miguel Tocuila (Tabla 4.1).

San Miguel, Tocuila					
Localidad	Nº de Perfil	Orientación	Longitud [m]	Intervalo entre geófonos [m]	Densidad de fuentes
Calle Morelos	Perfil 1	SE	22	2	5
Kinder	Perfil 2	NE	11	1	5
Terreno baldío	Perfil 3	N-S	22	2	5
	Perfil 4	NE	22	2	5
	Perfil 5	SE	22	2	5
	Perfil 6	NE	22	2	5

Tabla 4.1 Geometría de los perfiles sísmicos realizados en las cercanías del Museo Paleontológico de Tocuila.

4. 3. 3 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Estructura arqueológica “Perfil-1”

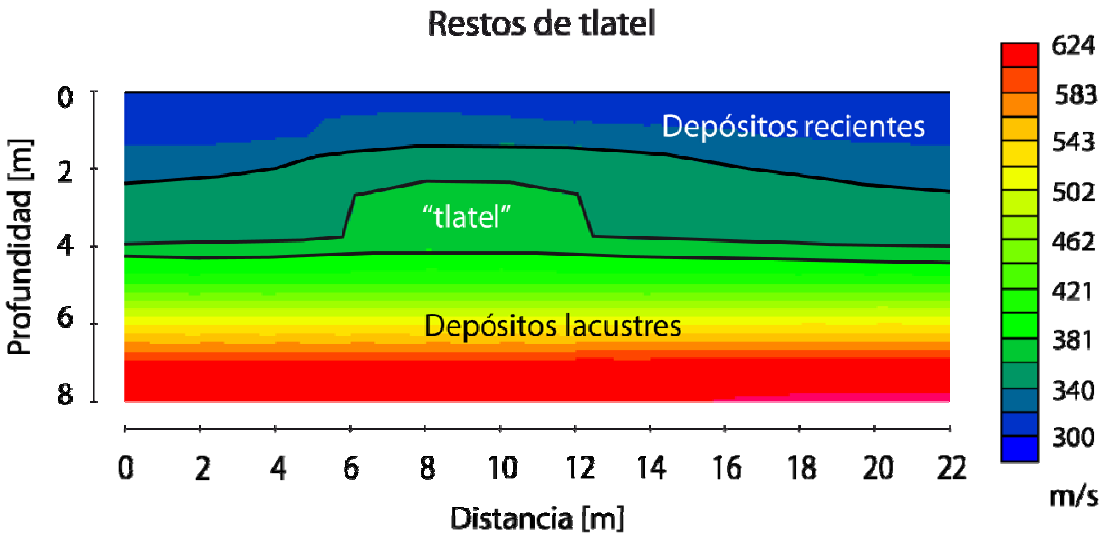

Figura 4.6 - Estructura en forma de tlatel, localizada en terrenos de propiedad privada sobre la calle José Maria Morelos en San Miguel Tocuila, Estado de México.

Figura 4.7 –Tlatel localizado en la región de Texcoco (Tomada de Parsons, 1971) el cual presenta una geometría muy similar al obtenido en el Perfil-1 realizado sobre la calle de José Maria Morelos, en la localidad de Tocuila.

Interpretación del Perfil-1

En esta sección de velocidades sísmicas (Figura 4.6) se observan capas que incrementan su velocidad con la profundidad gradualmente en el intervalo de 300 a 620 m/s. En el intervalo de velocidad de 300 a 420 m/s y entre los metros 2.20 y 4.10 de profundidad existe una estructura bien definida en forma de montículo. La geometría erosionada de esta estructura se interpretó como restos de un tlatel, cubierto por una capa de suelo y depósitos recientes no consolidados, de acuerdo con la figura 4.7 se puede observar claramente que la geometría de este tipo de estructuras erosionadas es muy similar a la mostrada en la sección sísmica con lo cual existe la posibilidad de que en este sitio de estudio se localice una estructura prehispánica. El hecho de que esta estructura presente valores de velocidad tan bajos se debe principalmente a que ha estado sujeta a los agentes de intemperismo los cuales debilitan y erosionan los materiales que conforman esta estructura.

Depósito Paleontológico “Perfil-2”

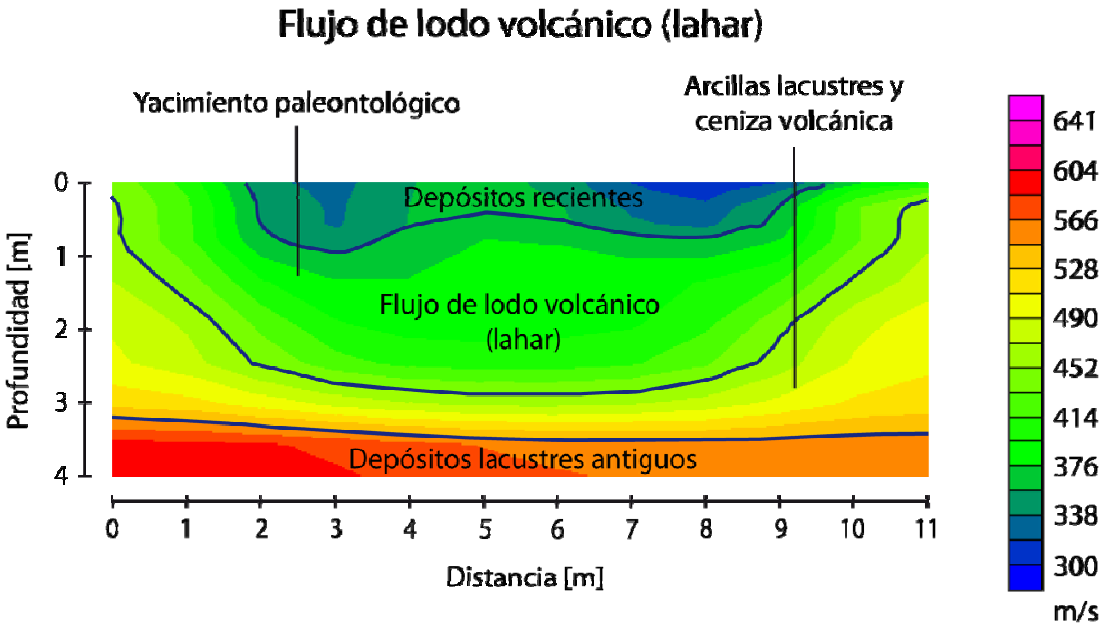

Figura 4.8- Estructura en forma de paleocanal, localizada detrás del museo paleontológico de Tocuila sobre terrenos de propiedad privada en San Miguel Tocuila, Edo. de México.

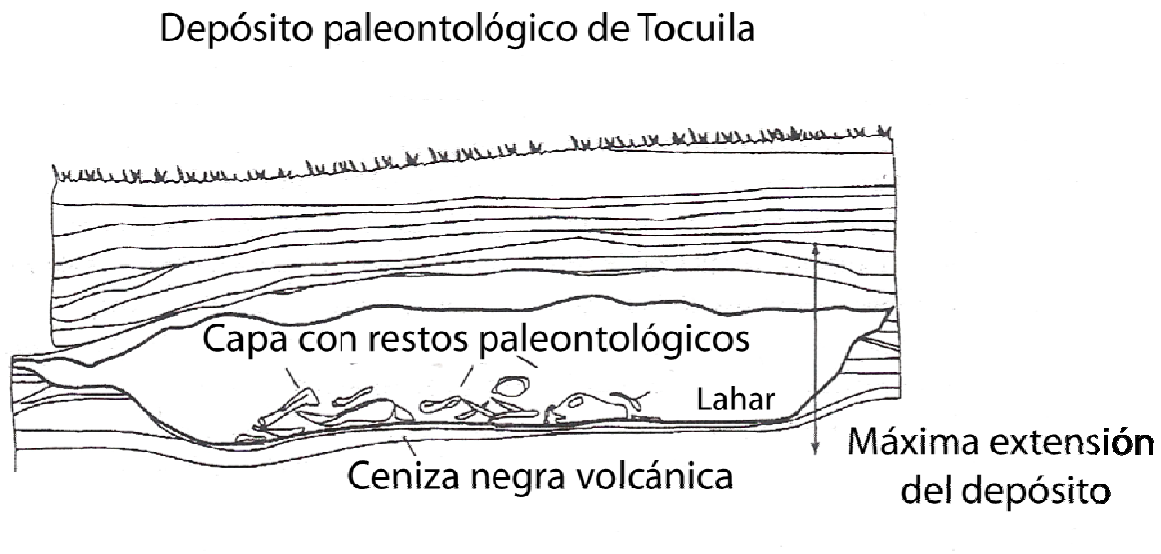

Figura 4.9- Esquema del depósito de megafauna ubicado en el Museo Paleontológico de Tocuila (Modificado de Gonzáles et al., 2006).

Interpretación del Perfil-2

En la sección de tomografía de la Figura 4.8 es posible distinguir tres capas de materiales, las cuales se describen a continuación: La primera capa que va de los 300 a 370 m/s, de acuerdo con el marco geológico local corresponde a depósitos recientes, suelos y materiales compactados. La segunda capa se localiza dentro del intervalo que va de 376 a 452 m/s, entre los metros 0.5 y 2.7 de profundidad, esta capa es de gran importancia ya que su geometría en forma de canal, de aproximadamente 7 m de longitud, concuerda con la capa de flujo volcánico (lahar) que contiene los restos de mamuts y otros animales vertebrados en el museo paleontológico de Tocuila (Figura 4.9). La forma de canal interpretada en esta sección y su cercanía con el museo paleontológico nos permite afirmar que ambos canales forman parte del mismo cauce sobre el cual fluyeron los lahares desde las montañas y finalmente sepultaron a los mamuts, lo cual abre la posibilidad de que en este nuevo sitio se encuentren más restos óseos de megafauna correspondientes al pleistoceno tardío.

La última capa se encuentra en el intervalo de 452 a 604 m/s ubicada en algunas porciones de la sección desde los 0.5 m hasta los 3.4 m de profundidad, la cual debido a la cercanía de los canales y de acuerdo con el estudio estratigráfico detallado del deposito paleontológico realizado por Gonzáles et al. (2006) corresponde a una secuencia de arcillas lacustres y de cenizas volcánicas las cuales finalmente sobreyacen a una secuencia mucho mayor de lo que se ha interpretado aquí como depósitos lacustres antiguos no alterados.

Estructura Arqueológica “Perfiles 3-6 arreglo en estrella”

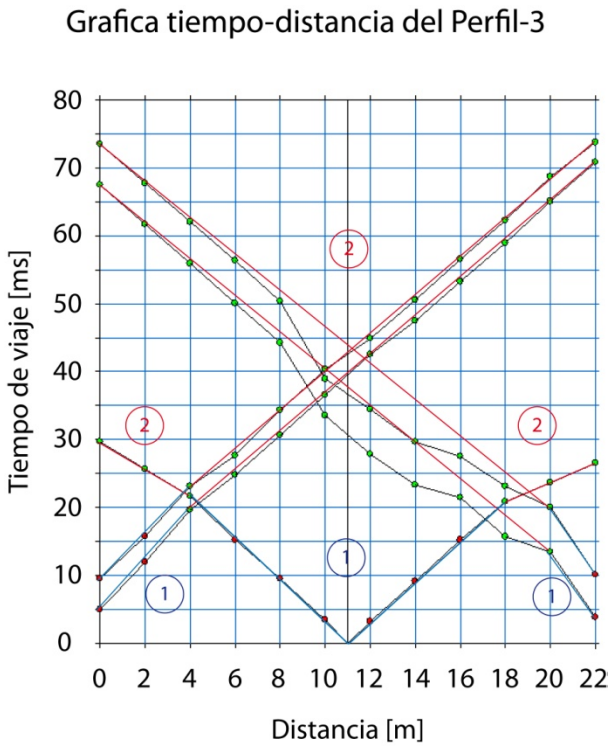

Figura 4.10- Grafica tiempo-distancia obtenida a partir del perfil-3 en la cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a dos capas.

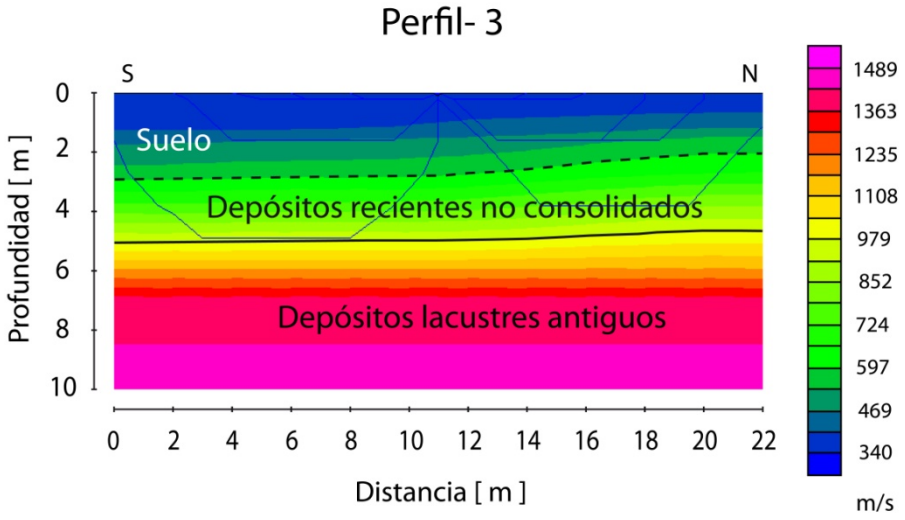

Figura 4.11- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al perfil-3 en la que se logran distinguir dos tipos de materiales correspondientes a suelos y materiales de origen lacustre.

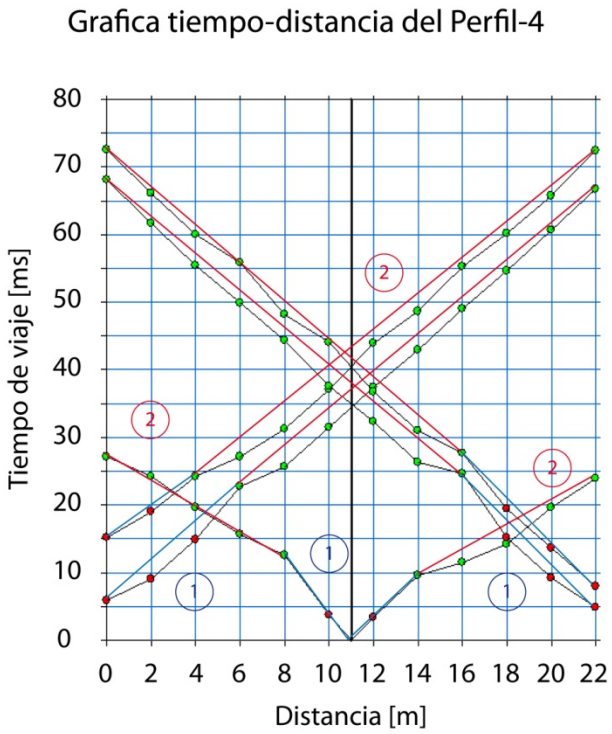

Figura 4.12- Grafica tiempo-distancia obtenida a partir del perfil-4 en la cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a dos capas.

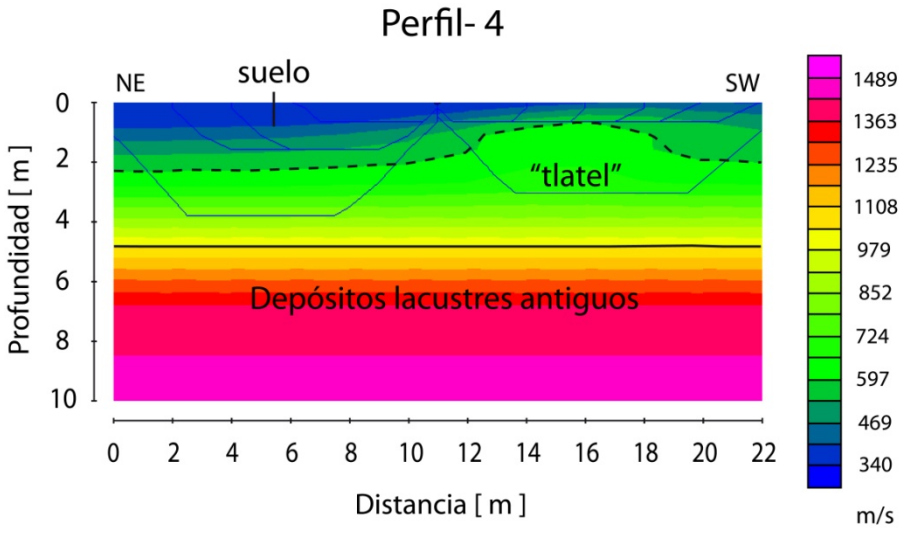

Figura 4.13- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al perfil-4 en la que se aprecia una estructura anómala provocada probablemente por los restos de un tlatel.

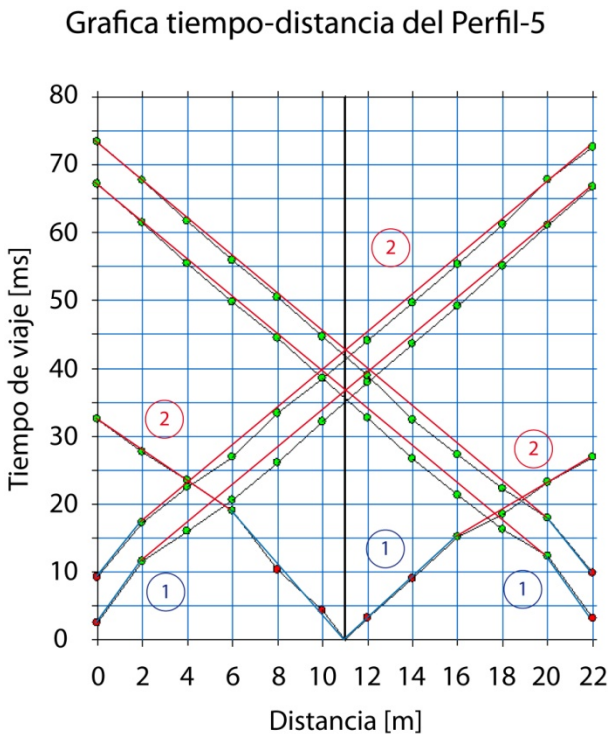

Figura 4.14- Grafica tiempo-distancia obtenida a partir del perfil-5 en la cual se observa nuevamente que los tiempos medidos presentan una tendencia en general de dos capas.

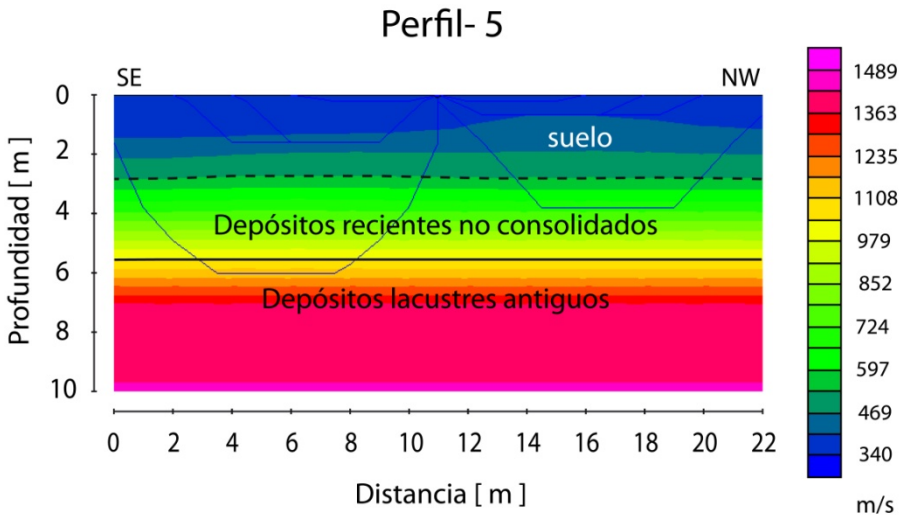

Figura 4.15- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al perfil-5 en la que se logran distinguir dos tipos de materiales correspondientes a suelos y materiales de origen lacustre.

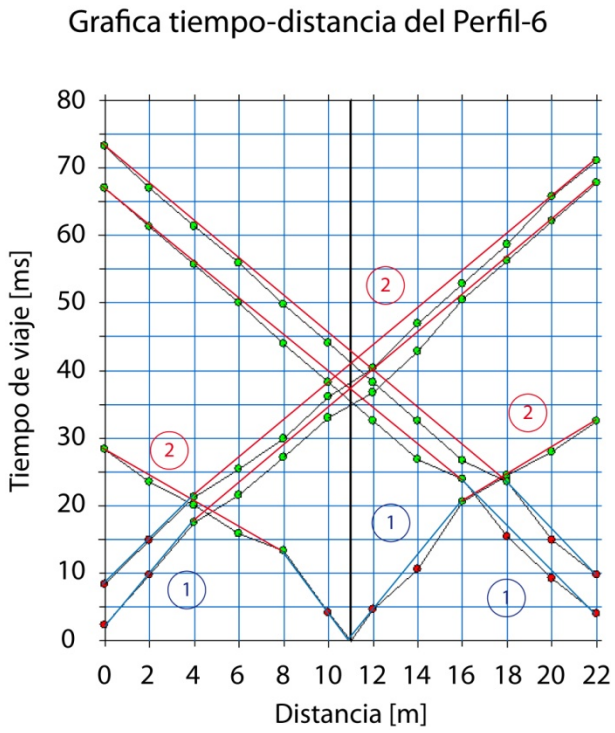

Figura 4.16- Grafica tiempo-distancia obtenida a partir del perfil-6 en la cual se observa nuevamente que los tiempos medidos presentan una tendencia en general de dos capas.

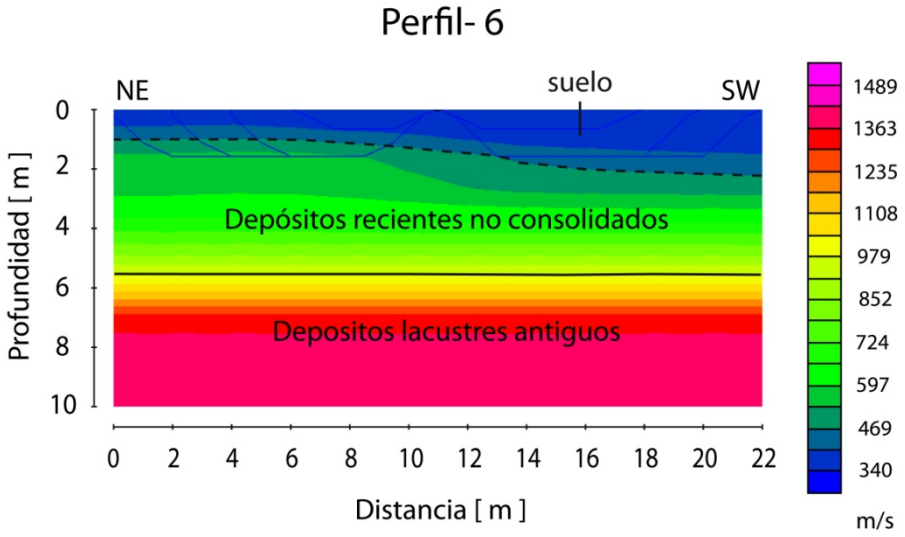

Figura 4.17- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al perfil-6 en la que se logran distinguir dos tipos de materiales correspondientes a suelos y materiales de origen lacustre.

Interpretación de los Perfiles 3-6

En este conjunto de secciones sísmicas (Figuras 4.11, 413, 4.15, 4.17) se han logrado identificar dos grupos de capas, el primero se ha considerado como de muy baja velocidad, comprendido dentro del intervalo de 340 a 979 m/s, mismo que se ha interpretado como depósitos recientes, suelos y materiales compactados. El segundo grupo se ha considerado como de baja velocidad comprendido dentro del intervalo de 979 a 1489 m/s los cuales se han interpretado como depósitos lacustres antiguos. En el Perfil-4 se distingue una estructura con forma de montículo entre los metros 1 y 3 de profundidad. La geometría de esta estructura puede definir lo que posiblemente sea un tlatel, el cual se encuentra sepultado por materiales recientes. Al igual que en el Perfil-1 el hecho de que la velocidad sea tan baja en esta estructuras se debe a que los agentes de intemperismo han debilitado los materiales que conforman esta estructura haciéndolos más deleznables.

Por último se realizo un mapa de velocidades sísmicas usando los perfiles 3 a 6, la Figura 4.18 se obtuvo a partir de la interpolación de los valores de velocidad sísmica aplicando el método de kriging (Surfer v9.0). En la Figura 4.11 se aprecia una anomalía ubicada sobre el Perfil-4, la cual de acuerdo a la distribución de velocidades puede interpretarse como una posible estructura de tipo arqueológico en forma de tlatel debido al contraste de velocidades que existe entre la anomalía y el resto del mapa de velocidades sísmicas.

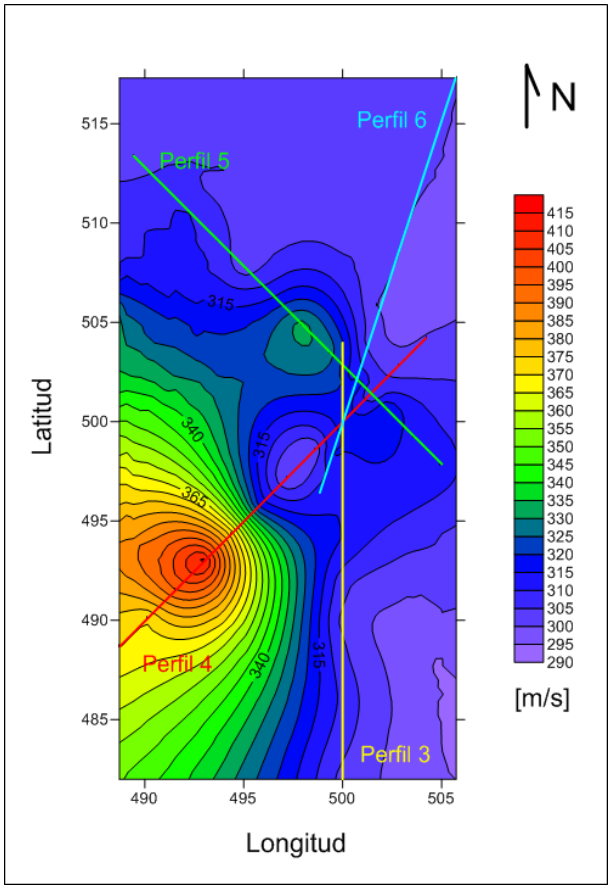

Figura 4.18- Mapa de velocidades sísmicas, la cual nos muestra la anomalía provocada por una posible estructura arqueológica en forma de tlatel.

A continuación se presenta una síntesis de las estructuras arqueológicas interpretadas a partir de las secciones sísmicas realizadas en el área de estudio de San Miguel Tocuila entre la calle José Ma. Molina y la avenida 16 de septiembre en las cercanías del museo paleontológico de Tocuila (Tabla 4.2)

Nº de Perfil	RMSE [ms]	Estructuras localizadas	Distribución [m]	
			Longitud	Profundidad
Perfil 1	0.95	Reminiscencias de un tlatel	6.40	2.0- 4.10
Perfil 2	1.50	Flujo de lodo volcanico	11.0	0- 3.7
Perfil 3	0.25	Capas horizontales	-----	-----
Perfil 4	0.88	Reminiscencias de un tlatel	5	1- 4.5
Perfil 5	0.50	Capas horizontales	-----	-----
Perfil 6	1.65	Capas horizontales	-----	-----

Tabla 4.2- Interpretación de los perfiles sísmicos realizados en el área de estudio de San Miguel Tocuila, Estado de México.

5. CASO DE ESTUDIO CIUDAD DE MORELIA, MICHOACÁN DE OCAMPO

En este capítulo se expone de manera general la descripción geológica tanto estratigráfica como estructural de la región de Morelia, Michoacán; también se presenta de forma general la descripción del proceso de subsidencia que afecta a las obras civiles tales como viviendas, unidades habitacionales, pavimentos, tuberías, alcantarillados, etc. a lo largo de la Ciudad de Morelia. Finalmente se presentan los resultados, así como las interpretaciones realizadas de las secciones de velocidad sísmica, obtenidas a partir del uso del método de tomografía de refracción sísmica, durante la campaña de prospección geofísica realizada en el ciudad de Morelia a lo largo de las fallas "La Colina" y "Torremolinos" con el objetivo de determinar su área de influencia, así como sus características geométricas (tipo de falla, salto, rumbo y buzamiento) de dichas estructuras geológicas.

5.1 GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA

5.1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La ciudad de Morelia es la capital del estado de Michoacán, se encuentra localizada en la parte norte- oeste del estado, entre las latitudes 19º 38' y 19º 46' norte y longitudes 101º 06' y 101º 16' oeste (Figura 5.1), cubriendo un área de aproximadamente 1199 km^2 con una altura promedio de 1941 msnm (Ávila-Olivera, 2004).

Figura 5.1- Localización de la Ciudad de Morelia (Modificada de Arreygue et al., 2002).

5.1.2 GEOLOGÍA REGIONAL

La ciudad de Morelia se localiza en la intersección de dos provincias geológicas. Al sur, el vulcanismo miocénico formo la Sierra de Mil Cumbres (SMC), que forma parte de la sierra madre del sur. Al norte, se encuentran volcanes monogenéticos y conos de lavas pertenecientes al campo volcánico Michoacán-Guanajuato, que forma parte del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Estos últimos cubren a secuencias lacustres del Mioceno-Plioceno emplazados en cuencas pertenecientes a un segmento del sistema de fallas Morelia-Acambay (Garduño-Monroy, et al., 2001). Esta zona se caracteriza por la presencia de actividad sísmica y volcánica relacionada a numerosas estructuras activas con desarrollo e importancia regional, el caso más representativo es la falla Morelia-Acambay (Arreygue-Rocha, et al., 2002). La ciudad presenta diferentes estructuras

geológicas asociadas con el fenómeno de subsidencia (ligado principalmente a la sobreexplotación de acuíferos) y la presencia de fallas potencialmente sísmicas como "La Colina", "La Paloma" y "Tarímbaro" (Garduño-Monroy, et al., 2001).

5.1.3 GEOLOGÍA DEL ÁREA DE MORELIA

Descripción de las unidades estratigráficas

Desde el punto de vista estratigráfico, el área de Morelia está constituida por cinco unidades geológicas (Figura 5.2), las cuales se describen a continuación partiendo de la base hacia la cima, esta columna estratigráfica es la que se ha utilizado durante la interpretación de las secciones de tomografía de refracción sísmica obtenidas en el área de estudio.

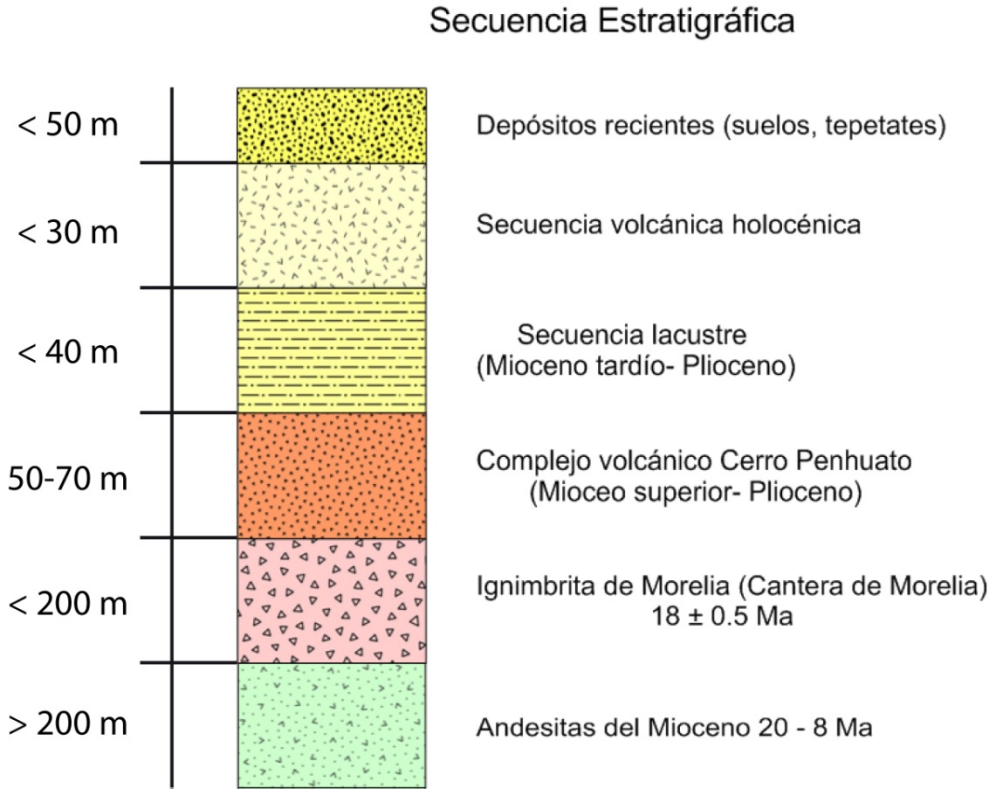

Figura 5.2- Secuencia estratigráfica de la Ciudad de Morelia (Modificada de Arreygue et al., 2002).

Andesitas del Mioceno

Esta unidad esta compuesta de lavas andesíticas de color verde intensamente alteradas y fracturadas que a menudo alternan con horizontes piroclásticos o con derrames de composición más máfica (Garduño-Monroy, et al., 2001). De acuerdo con estudios realizados esta secuencia abarca un rango de edades de entre 20 a 8 Ma, correspondiente al Mioceno. En las perforaciones de sondeo o de estudios hidrogeológicos realizados en el área de Morelia, esta unidad no ha sido perforada en su totalidad, y en la superficie no se ha encontrado su base, por lo que se desconoce su espesor, pero este se ha estimado que es mayor de 200 m (Ávila-Olivera, 2004).

Ignimbrita de Morelia (Cantera de Morelia)

Esta unidad consiste de varios horizontes de flujos piroclásticos de composición riolítica (Garduño-Monroy, et al., 2001; Ávila-Olivera, 2004). Cerca de su zona de emisión se compone de una brecha de rezago constituida por material reciente y fragmentos líticos accidentales de andesita del Mioceno. Siguen unidades de flujo piroclástico de color claro con bloques o lapilli de pómez alargados. Sobre estas se observa un flujo piroclástico con más fragmentos líticos y más deleznable que el anterior. En la cima hay una toba de flujo piroclástico soldada de color rosa, con grandes fiammes de pómez (Garduño-Monroy, et al., 2001). El espesor de la secuencia varia desde pocos metros hasta mas de 200 m (Garduño-Monroy, et al., 2001; Arreygue-Rocha, et al., 2002). Estudios hechos por Pasquaré et al. (1991) datan esta unidad en 18 ± 0.5 Ma correspondiente al Mioceno.

Secuencia volcánica del Cerro Penhuato

Esta secuencia de rocas esta constituida por derrames de lava de composición andesítica y dacítica, asociados con domos expuestos en la zona del Cerro Penhuato, al oriente de Morelia (Garduño-Monroy, et al., 2001). En realidad se trata de un complejo, el cual presenta una morfología en forma de herradura en donde los materiales piroclásticos asociados forman un abanico al oriente de la ciudad, lo que se puede interpretar como evidencia de una gran explosión lateral (Garduño-Monroy, et al., 2001; Avila-Olivera, 2004). Israde-Alcántara, (1995) ha considerado que su edad se podría ubicar dentro del Mioceno ya que subyace a los sedimentos lacustres del Mioceno superior-Plioceno.

Secuencia lacustre

Esta secuencia aflora en la parte sur de Morelia, donde los pozos perforados han cortado espesores hasta de 40 metros de depósitos fluviolacustres. En el sector norte de Morelia, la secuencia sobreyace a un basamento volcánico y esta constituida por una alternancia de arenas, gravas y limos (Garduño-Monroy, et al., 2001). De acuerdo con estudios realizados por Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999 a esta unidad la sobreyace un deposito piroclástico de caída aérea al que han denominado “alegría”, el cual puso fin a la antigua zona lacustre de Morelia.

Secuencia volcánica holocénica

La unidad estratigráfica mas reciente de la región de Morelia corresponde a productos del vulcanismo monogenético del CVM. Son lavas andesítico- basáltica y basáltica que provienen de los volcanes Cerro Quinceo y Cerro Las Tetillas (Garduño-Monroy, et al., 2001). También forma parte de esta unidad la secuencia de pómez de caída aérea (alegría) la cual en algunas zonas cuenta con espesores considerables de hasta 5 m (Avila-Olivera, 2004).

Descripción de las fallas geológicas de Morelia

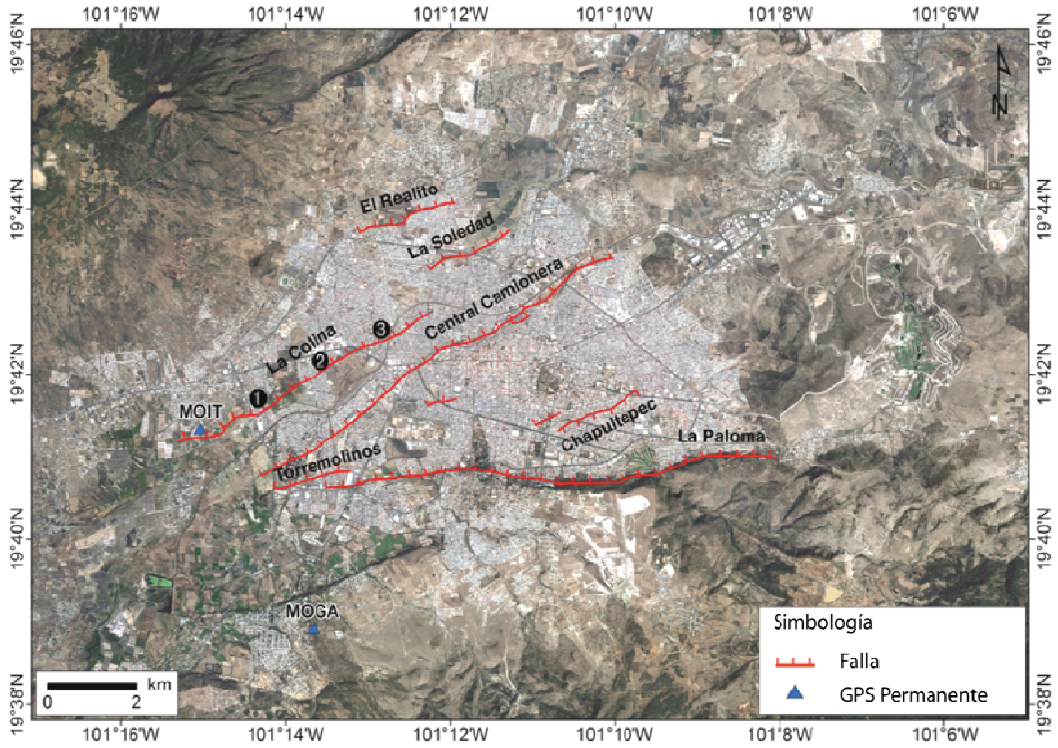

Figura 5.3- Fallas ubicadas dentro de la región de Morelia, asociadas con el fenómeno de fluencia Central Camionera, Chapultepec, Torremolinos, El Realito y La Soledad y las potencialmente sísmicas La Colina y La Paloma (Modificada de Cabral- Cano et al., 2010).

A lo largo de la región de Morelia es posible observar que gran parte de su morfología esta configurada por fallas geológicas (Figura 5.3), las cuales en décadas recientes han presentado gran actividad de desplazamiento. Las fallas presentan orientaciones preferenciales NE- SW, E-W y NW- SE y se han dividido en dos grupos:

El primer grupo engloba las estructuras que son paralelas a los sistemas de fallas regionales NE- SW y se desplazan continuamente por creep o fluencia. Estas fallas afectan solamente a suelos y secuencias fluviolacustres del Mioceno-Pleistoceno que forman el relleno de la cuenca donde se asienta la ciudad. Estas estructuras se han reactivado debido principalmente a la excesiva extracción de agua y pueden causar

cambios de volumen o movimientos de flujo conocidos como fluencia (Garduño-Monroy, et al., 2001).

El segundo grupo, comprende las fallas potencialmente sísmicas, es decir aquellas donde ha ocurrido acumulación de esfuerzos y desplazamientos súbitos durante los últimos 35 000 años asociadas a las condiciones tectónicas de la región. En estas ultimas se han encontrado evidencias morfológicas y estratigráficas de rupturas durante el Holoceno, sin embargo no existe registro histórico o instrumental de sismicidad asociada a ellas (Garduño-Monroy, et al., 2001).

Las fallas geológicas asociadas con hundimientos diferenciales tales como "La Colina", "Central Camionera", "Torremolinos", "Cuautla" y "Chapultepec" (Figura 5.3), presentan una orientación NE-SW y todas tienen el bloque hundido en el lado norte a excepción de la falla Chapultepec cuyo bloque se encuentra hundido hacia el sur. El desplazamiento actual de estas fallas se encuentra asociado a la sobreexplotación del acuífero, al comportamiento mecánico de los suelos (Creep) y a las técnicas de extracción de agua (Garduño-Monroy, et al., 1999; 2001).

Falla Central Camionera

Esta estructura es la de mayor extensión en la zona, tiene una dirección N60°E. Su segmento mas activo se localiza entre las instalaciones del IMSS y la Av. Morelos Norte en donde la traza de la falla es curva, lo que provoca la formación de pequeñas estructuras de tipo pull apart. Esta geometría ha producido una zona de influencia de mas de 25 m en el sector NE, mientras que en el sector SW la zona de influencia no es mayor a 10 m (Garduño-Monroy, et al., 2001).

Falla Chapultepec

Esta estructura tiene una dirección NE- SW, con un desnivel de 50 cm hacia el SE. Su zona de influencia es variable, siendo en la zona Central de 30 m hacia ambos lados de la falla; hacia la parte del Seminario Claretiano 10 m en ambos lados y hacia el sur del Boulevard de los García 5 m en ambos lados de la falla (Garduño-Monroy, et al., 2001).

Falla Torremolinos

Tiene una dirección NE-SW y el bloque hundido es al NW. Su zona de influencia es de 8 m a ambos lados de la falla y su desnivel es mayor en el hotel Torremolino, 40 cm aproximadamente, en tanto que hacia su extremo NE por ahora tiene forma de grieta.

En la región de Morelia, las fallas que pueden considerarse con características sísmicas potenciales son “La Colina”, “Tarímbaro” y los segmentos del sistema de fallas Acambay- Morelia como “La Paloma”, “Cerritos” y “Coíntzio”. A continuación solo se describen las fallas La Colina y La Paloma ya que estas son las que afectan de manera directa la zona urbana de la Ciudad de Morelia(Avila-Olivera, 2004).

Falla la Colina

Esta estructura tiene dirección NE-SW y un relieve morfológico de 4 m en su sector NE. Esta identificada como una falla de tipo normal que forma una contrapendiente en las lavas del Cerro Quinceo hacia el SW. Esta estructura 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 m a ambos lados de la falla, de 15 cm en las Aguilas, Lopez Mateos y Agua Clara y de 20 m en la zona de Manantiales (Garduño-Monroy, et al., 2001).

Falla la Paloma

Esta falla se localiza al sur de Morelia, es considerada una falla de tipo regional debido a su extensión, tiene una dirección E- W y un desnivel de más de 200 m. El escarpe de la falla tiene una expresión sobresaliente hacia el oriente mientras que su altura va disminuyendo hacia el poniente. Esta falla pertenece al denominado "Sistema activo de fallas Morelia-Acambay" (Avila-Olivera, 2004).

5.1.3 PROCESO DE SUBSIDENCIA

Desde 1983, en la capital del estado de Michoacán, Morelia, se empezaron a apreciar problemas de hundimientos diferenciales, ocasionando daños importantes en obras civiles como son viviendas, unidades habitacionales, pavimentos, líneas de alcantarillado y agua potable, etc. como se puede apreciar en la Figura 5.3. Dichos hundimientos definen trazas rectas en la superficie con direcciones paralelas a sistemas de fallas regionales (Garduño-Monroy et al., 2001).

Figura 5.3- Daños en casas habitación, debido a hundimientos asociados con la falla "La Colina" y la excesiva extracción de agua del subsuelo. Colonia Tres Puentes, Morelia (Arciniega, 2008).

Para el año de 1988, se tenían identificadas a lo largo de la ciudad cuatro fallas geológicas: “La Colina”, “Central Camionera”, “Chapultepec” y “La Paloma” esta última de carácter regional. En el año de 1993 el número de fallas se incremento a seis, cuando se identificaron los fallamientos “El Realito”, “La Soledad” y “Torremolinos”. Finalmente en 1999 se identificaron dos fracturas “Cuautla” y “Puente Ventura” estas de menor extensión, en comparación con la longitud presentada por las estructuras anteriores (Ávila-Olivera, et al., 2006).

La mecánica que da lugar a este tipo de estructuras implica la conjunción de una serie de elementos, entre ellos la presencia de fallas geológicas previas que controlaron el depósito de sedimentos lacustres y fluviolacustres, así como la ocurrencia de subsidencia debida generalmente a la sobreexplotación de los sistemas acuíferos (Figura 5.4), lo que da lugar a una deformación lenta, continua y asísmica (creep). Estos elementos interactúan entre si ocasionando lo que se denomina un Proceso de Subsidencia- Creep-Falla.

Figura 5.4- La sobreexplotación del acuífero y la falta de planificación de las zonas habitacionales en la Cd. de Morelia provocan la pérdida total de las mismas (Arciniega, 2008).

5.2 ESTUDIO DE TOMOGRAFIA DE REFRACCION SISMICA

5.2.1 ESTUDIOS GEOFÍSICOS PREVIOS

Desde la aparición de la primeras fallas en la ciudad de Morelia, en la década de los 80`s, se han realizado numerosos estudios geológicos, geofísicos y de geotecnia. En algunos casos se han combinado estos estudios, con el objetivo de investigar los procesos que dan origen a la subsidencia y explorar el área de influencia que pueden tener las fallas provocadas por este fenómeno.

La exploración geológica ha consistido principalmente en estudios estratigráficos, de geología estructural y de tectónica, mientras que las exploraciones geofísicas se han basado principalmente en sondeos eléctricos verticales (SEV's), y recientemente se ha comenzado a utilizar el método de radar de penetración terrestre (GPR) con el cual se obtienen secciones transversales del subsuelo. Los estudios geotécnicos han consistido en la excavación de zanjas que permiten la obtención de muestras de suelo, con las que se realizan estudios de mecánica de suelos y desde luego permiten la comparación de los resultados obtenidos mediante las técnicas geofísicas (Avila-Olivera, 2006; Garduño-Monroy, 2008).

5.2.2 DISEÑO DEL ESTUDIO

En este trabajo el estudio de tomografía de refracción sísmica realizado en la ciudad de Morelia, se concentro principalmente en zonas afectadas por las fallas "La Colina" y "Torremolinos". Los sitios donde se efectuaron los levantamientos de refracción se eligieron siguiendo las evidencias de los efectos de las fallas en superficie y de acuerdo con las observaciones de campo tales como: hundimientos y deslizamientos en el pavimento, así como grietas y fisuras significativas en construcciones y obras civiles.

Los perfiles de refracción sísmica se orientaron perpendicularmente a la traza de la falla, cada perfil consistió en 2 líneas consecutivas de 12 geófonos y de longitud variable condicionada principalmente por las obras civiles desarrolladas a lo largo de la ciudad, a continuación se presentan en las tablas (5.1) y (5.2) las características geométricas de los tendidos, realizados a lo largo de las fallas "La Colina" y "Torremolinos".

FALLA "LA COLINA"					
Localidad	Nº de Perfil	Orientación	Longitud [m]	Intervalo entre geófonos [m]	Densidad de fuentes
Manantiales	Perfil 1	N- S	38	1	14
Tres puentes	Perfil 2	SE- NW	22	1	7
Tres puentes	Perfil 3	NW- SE	11	1	5
Tres puentes	Perfil 4	NW- SE	22	1	7
c. Ma. Molina	Perfil 5	NW- SE	22	1	7

Tabla 5.1- Características de los perfiles sísmicos ubicados a lo largo de la traza en superficie de la falla "La Colina".

FALLA "TORREMOLINOS"					
Localidad	Nº de Perfil	Orientación	Longitud [m]	Intervalo entre geófonos [m]	Densidad de fuentes
c. Pedro Bermeo	Perfil 6	SE - NW	22	1	5
c. Luciano Navarrete	Perfil 7	N19ºW- SE	22	1	5
c. Luciano Navarrete	Perfil 8	N19ºW- SE	19.8	1	5

Tabla 5.2- Características de los perfiles sísmicos ubicados a lo largo de la traza en superficie de la falla "Torremolinos".

5.2.3 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

A continuación se presentan las secciones sísmicas obtenidas mediante el método de inversión de tomografía y la interpretación usando la información de la columna estratigráfica descrita en la sección 5.1.

Falla “La Colina” Col. Manantiales

Gráfica tiempo-distancia Col. Manantiales (Perfil-1)

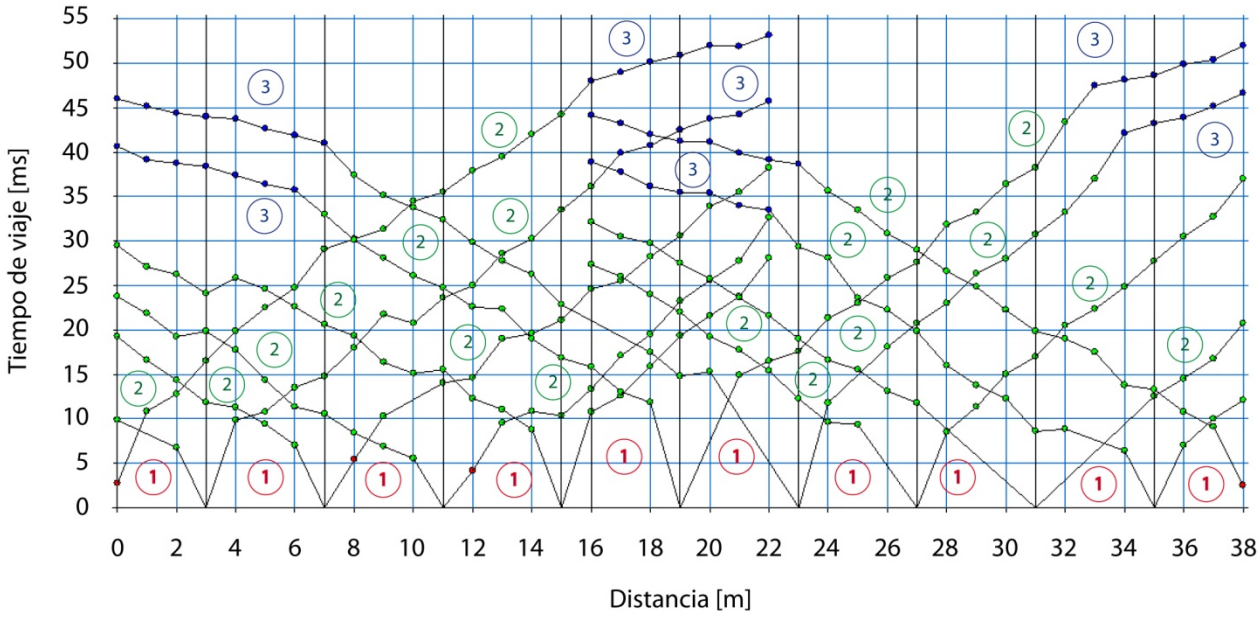

Figura 5.5- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-1 en el cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia general a tres capas.

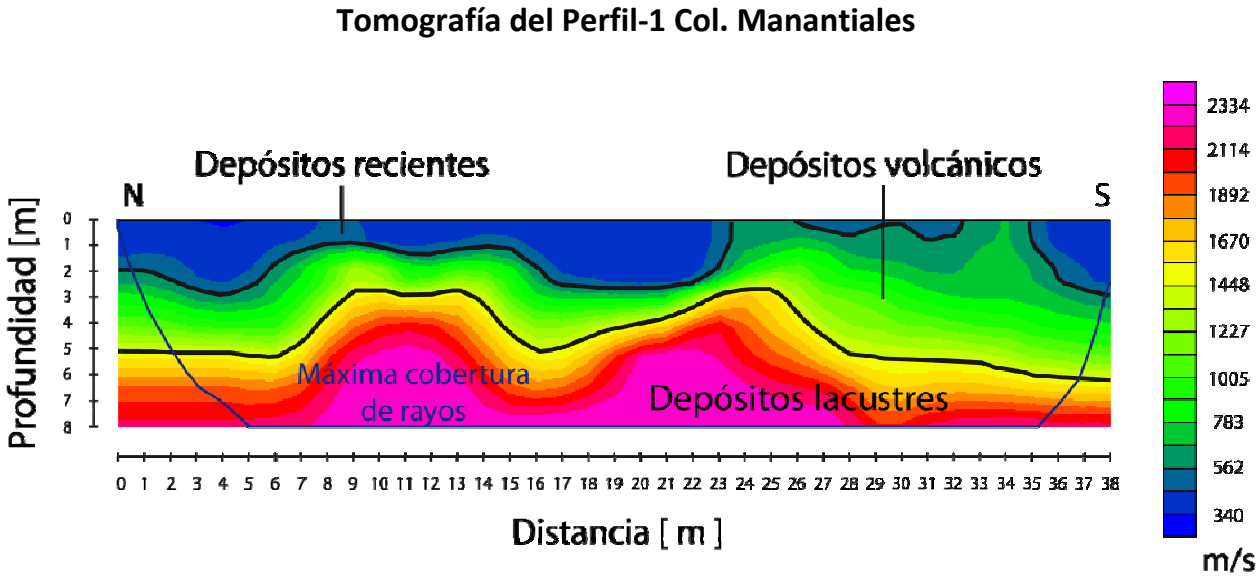

Figura 5.6- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-1, en la cual la cobertura de rayos ha permitido definir la geometría de una serie de hundimientos diferenciales entre las volcánica y lacustre.

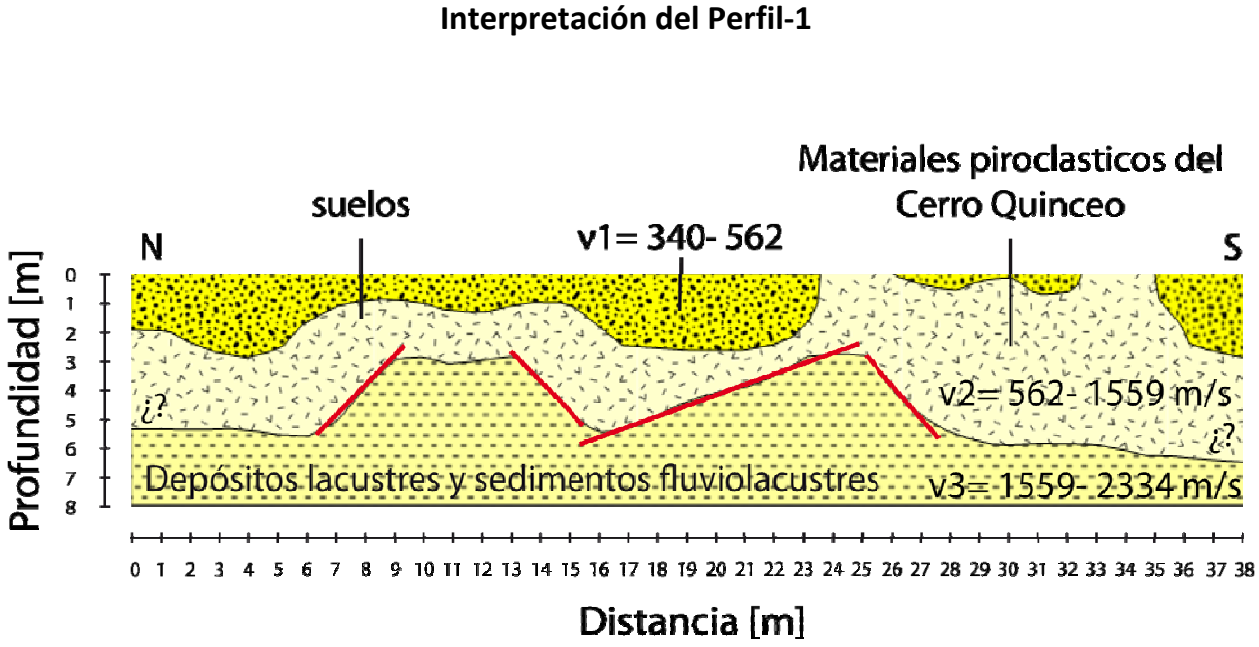

Figura 5.7- Interpretación de la sección sísmica, en la que se aprecian hundimientos diferenciales de entre 1.0 y 3.5 m aproximadamente entre los depósitos volcánicos y los depósitos lacustres.

Interpretación del Perfil-1 realizado en la colonia Manantiales.

En la sección de velocidades que corresponde al Perfil- 1 (Figura 5.6) se han identificado 3 intervalos de velocidad, los cuales se incrementan de forma gradual con la profundidad. El primer intervalo va de 340 a 562 m/s, el segundo de 562 a 1559 m/s y el tercero de 1559 a 2334 m/s; de acuerdo con la columna estratigráfica descrita en el apartado 5.1, el primer intervalo de velocidad se ha interpretado como una secuencia de suelos. El segundo intervalo corresponde a materiales piroclásticos provenientes del volcán Cerro Quinceo. El último intervalo se ha interpretado como una secuencia de depósitos lacustres y sedimentos fluviolacustres (Figura 5.7).

El hecho de que los materiales de origen ígneo presenten un intervalo de velocidad sísmica menor que el de los depósitos lacustres, puede asociarse principalmente a que estos se encuentren fuertemente intemperizados, también que al tratarse de materiales ígneos de origen extrusivo existe una cantidad considerable de aire contenido en sus vesículas lo cual modifica su densidad volumétrica, y por lo tanto también la velocidad de las ondas sísmicas. Por último se debe considerar que los depósitos de origen lacustre al ser más antiguos se han encontrado más tiempo sujetos a diversos factores como cementación, compactación, esfuerzos tectónicos, etc., que modifican la velocidad de las ondas sísmicas provocando que se propaguen más rápido a través de esta unidad.

Estructuralmente esta sección presenta una serie de hundimientos diferenciales asociados a una familia de fracturas, provocadas por los procesos de subsidencia. Además se puede observar en la interpretación del Perfil-1 (Figura 5.7) que entre los metros 6 y 29 de longitud esta familia de fracturas pone en contacto discordante a los materiales del Cerro Quinceo con los depósitos de origen lacustre. El daño provocado por estos hundimientos es más que evidente en superficie ya que se han demolido varias casas y otras más presentan daño en su estructura.

Falla “La Colina” Col. Tres Puentes

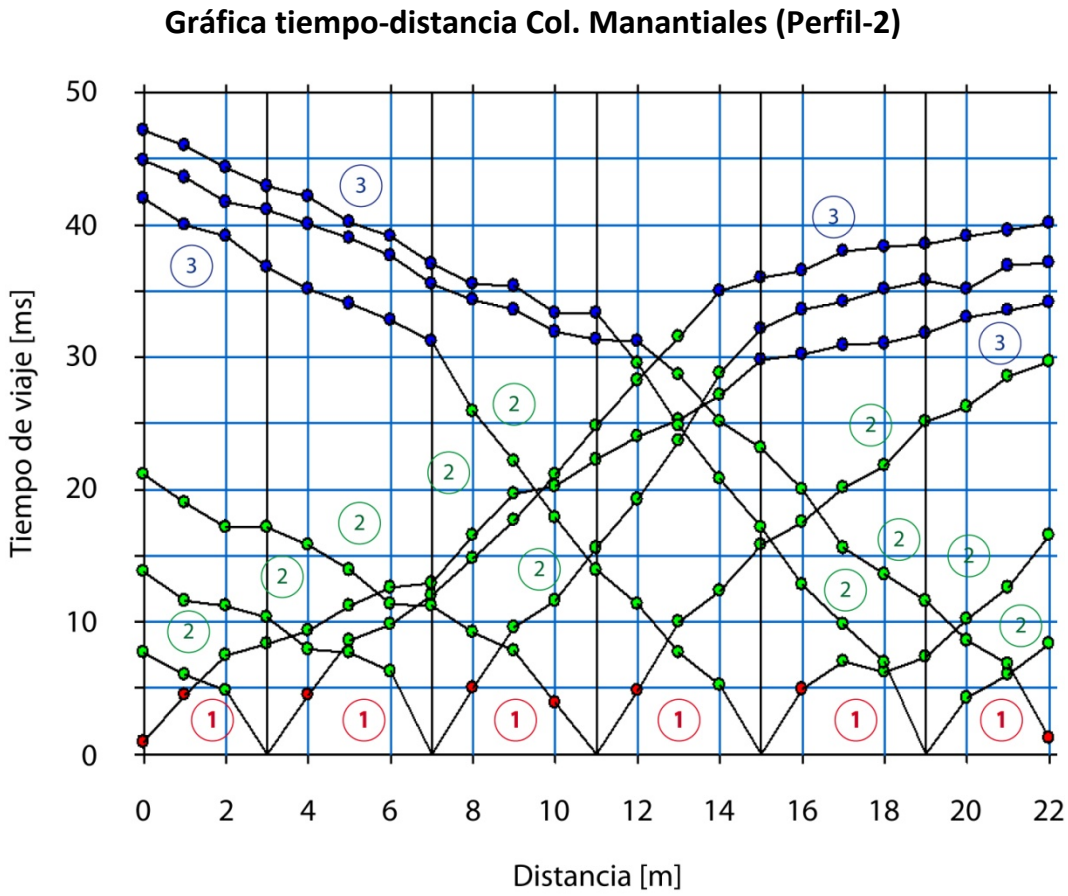

Figura 5.8- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-2 en el cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

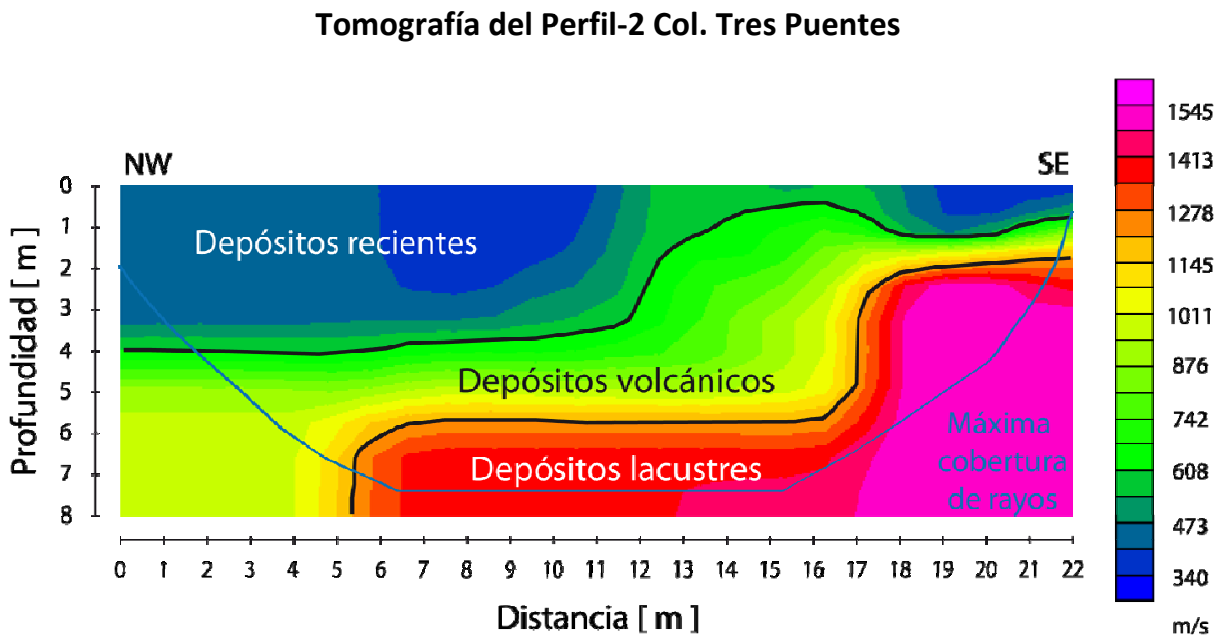

Figura 5.9- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-2, en la cual la cobertura de rayos ha permitido definir la geometría de una falla de tipo normal entre los depósitos volcánicos y lacustres.

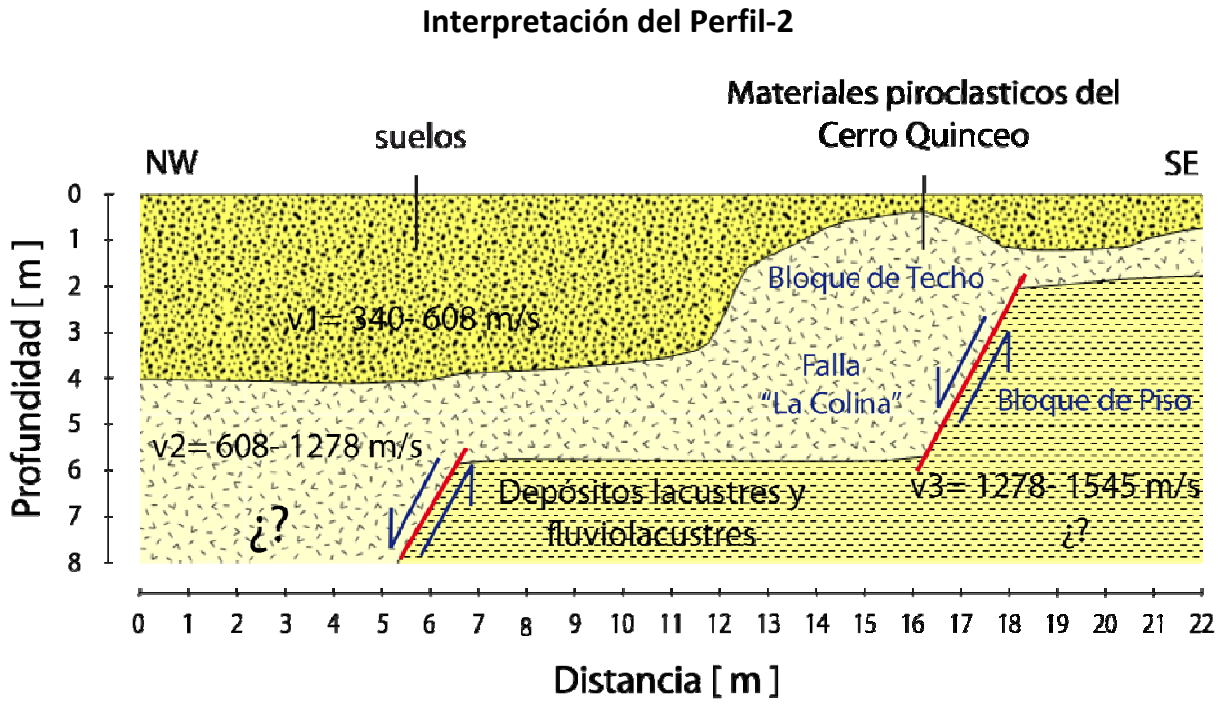

Figura 5.10- Interpretación de la sección sísmica, en la que se aprecian un desplazamientos de 4.0 y posiblemente otro de 2.5 m entre los depósitos volcánicos y los lacustres.

Falla “La Colina” Colonia Tres Puentes

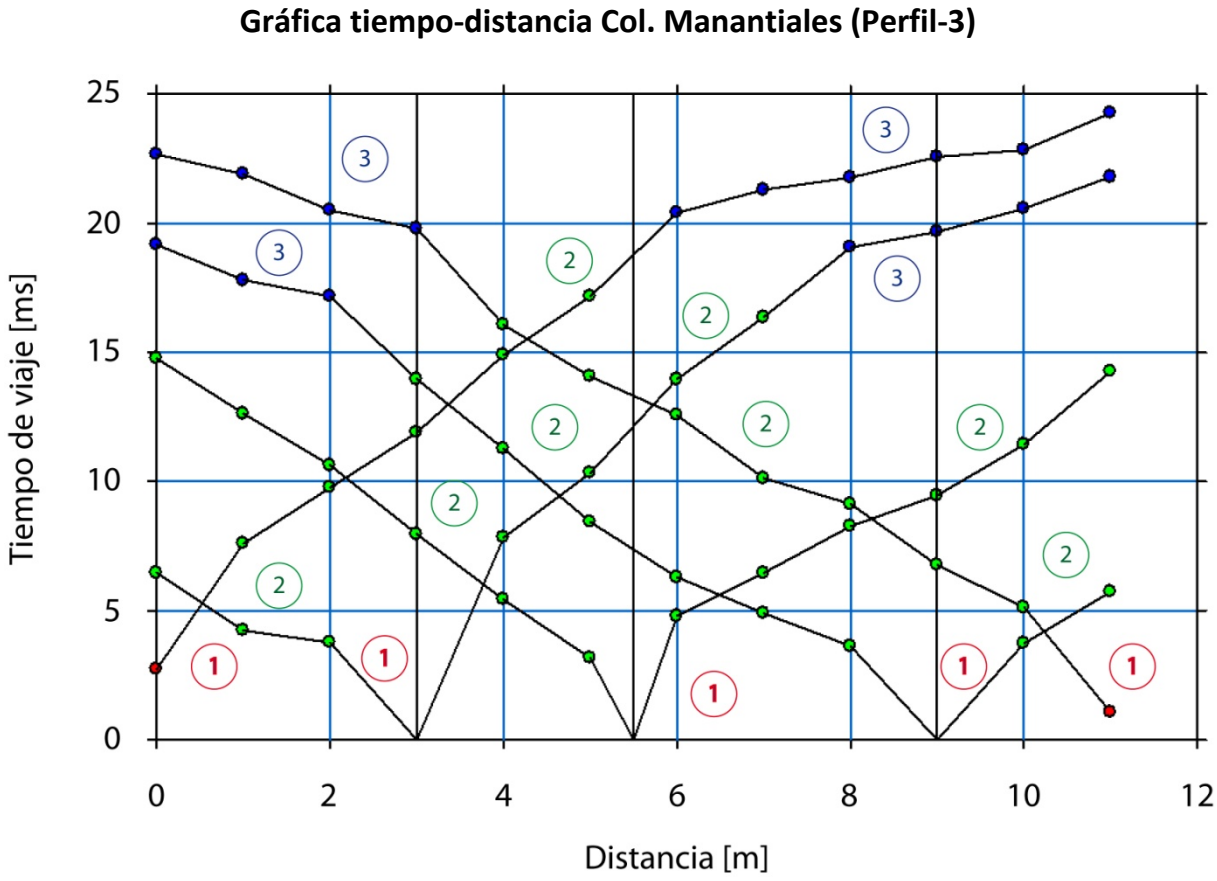

Figura 5.11- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-3 en el cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

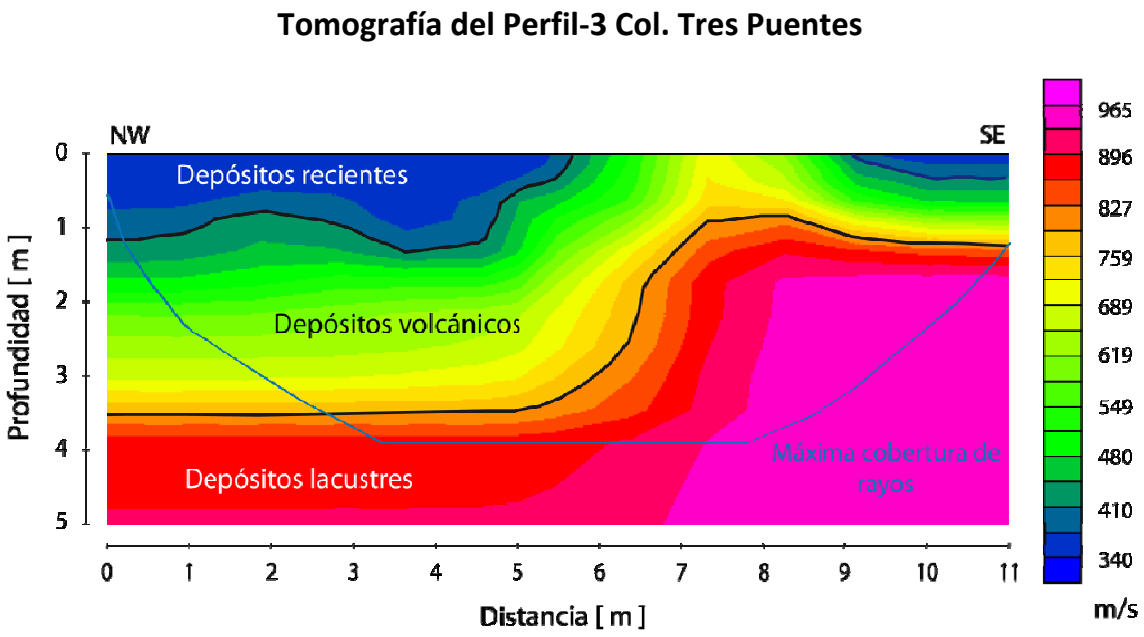

Figura 5.12- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-3, en la cual la cobertura de rayos ha permitido definir la geometría de una falla de tipo normal entre los depósitos volcánicos y lacustres con un salto de 2.5 m aproximadamente.

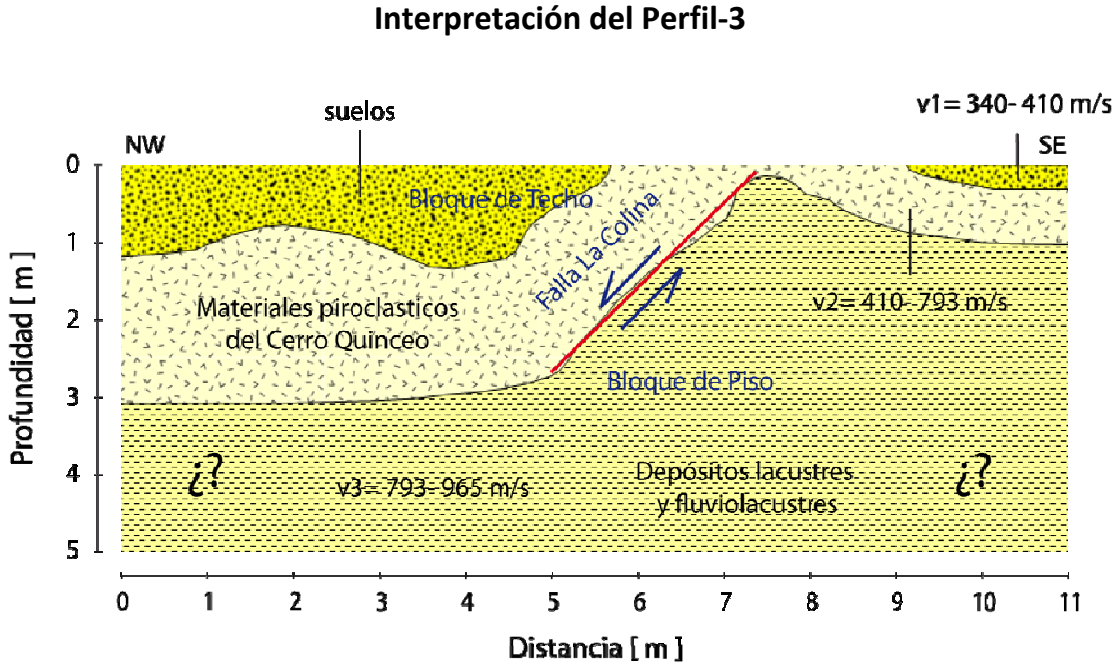

Figura 5.13- Interpretación de la sección sísmica, en la que se observa un hundimiento de 2.5 m provocado por la falla la cual que pone en contacto a los depósitos de origen volcánico con los depósitos lacustres.

Falla “La Colina” Colonia Tres Puentes

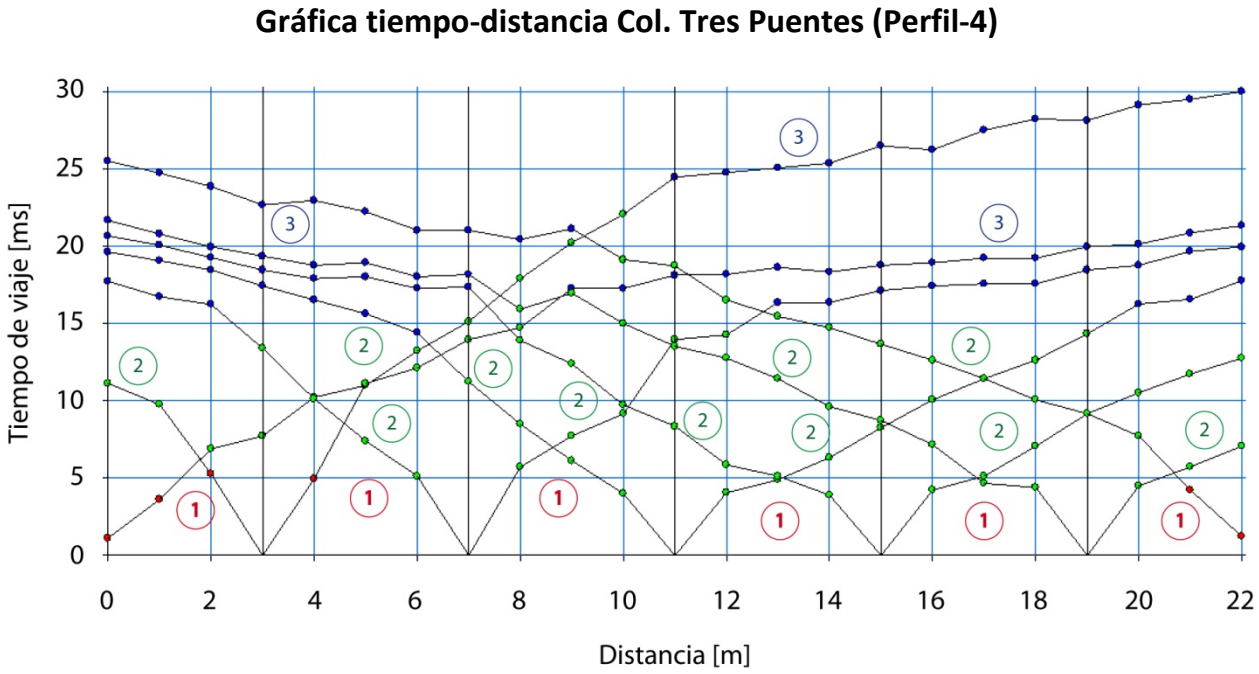

Figura 5.14- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-4 en el cual se observa nuevamente que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

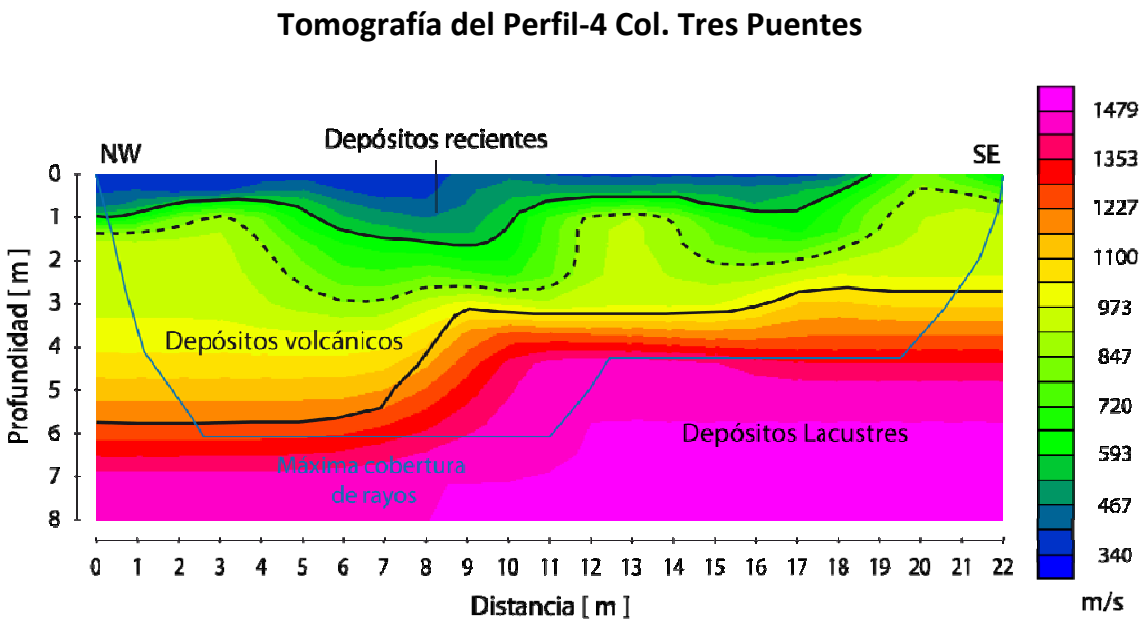

Figura 5.15- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-4, en esta sección nuevamente la cobertura de rayos ha permitido definir la geometría de una falla de tipo normal.

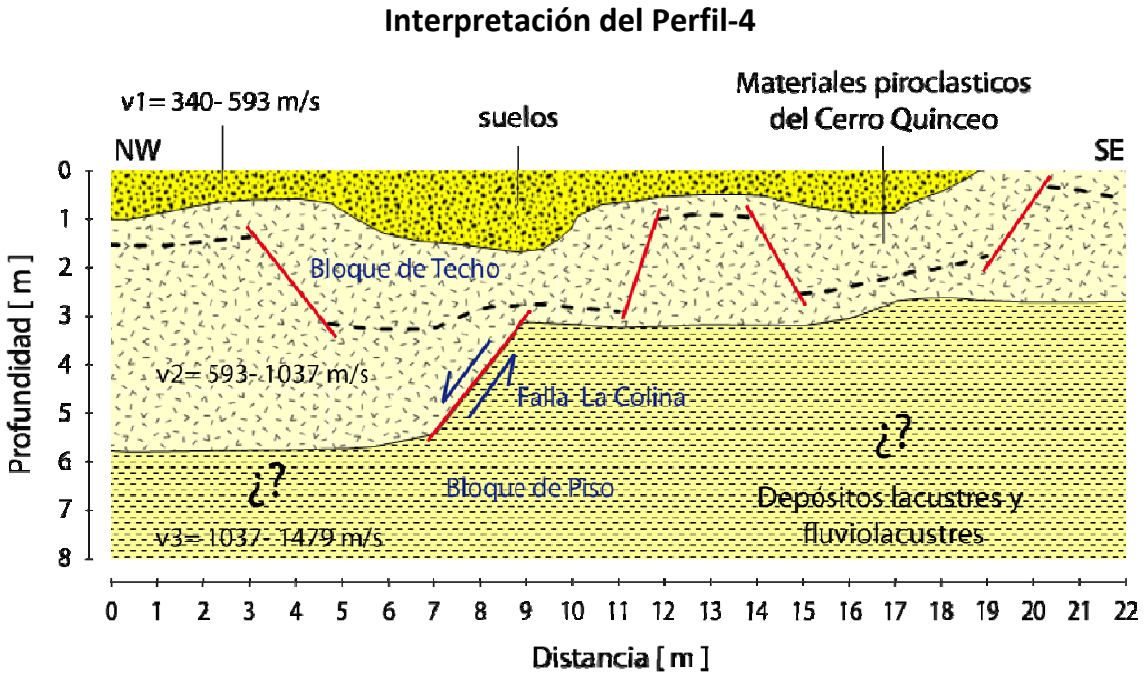

Figura 5.16- Interpretación de la sección sísmica, en la que se aprecia un desplazamiento de aproximadamente 3.0 m entre los depósitos volcánicos y los depósitos lacustres, también se observa que la unidad de origen volcánico se encuentra fuertemente fracturada.

Interpretación de los Perfiles 2-4, realizados en la Colonia Tres Puentes

En las secciones de velocidad sísmica correspondientes a la zona de estudio de Tres Puentes (Figuras 5.9, 5.12 y 5.15) se identifican 3 intervalos de velocidad sísmica, los cuales aumentan de forma gradual con la profundidad. En este conjunto de secciones, los tres intervalos de velocidad se han interpretado de la base hacia la cima como: depósitos lacustres y fluviolacustres, materiales piroclásticos provenientes del volcán Cerro Quinceo, y por último, los materiales recientes y suelos. La razón por la que los materiales ígneos presenten una velocidad sísmica menor que los depósitos lacustres se ha considerado que es la misma expuesta en el apartado anterior.

En el Perfil-2 (Figura 5.9) se puede identificar un sistema de fallamientos escalonados, cuyas características geométricas se presentan en la Tabla 5.3, estos fallamientos ponen en contacto los depósitos provenientes del volcán Cerro Quinceo con los depósitos lacustres y fluviolacustres (Figura 5.10), provocando en superficie una serie de hundimientos diferenciales que afectan las estructuras de las construcciones situadas por encima de estos fallamientos. Los bloques hundidos se localizan hacia el NW por lo que se puede afirmar que el desplazamiento de mayor extensión corresponde con el plano de falla de "La Colina", mientras que el de menor extensión puede interpretar como una falla sintética consecuencia de los esfuerzos.

En el Perfil-3 (Figura 5.12) se observa claramente un fallamiento, el cual pone en contacto discordante a los materiales piroclásticos provenientes del volcán Cerro Quinceo con depósitos de origen lacustre como se observa en la Figura 5.13. Esta estructura ha provocado un desnivel considerable a nivel de la superficie provocando daños en algunas construcciones ubicadas por encima de este fallamiento. El bloque de piso se localiza

hacia el NW con lo que se puede considerar que este plano de falla corresponde con el de la falla "La Colina".

En el Perfil- 4 (Figura 5.15) se observa que existe un fallamiento considerable localizado entre los materiales piroclásticos provenientes del volcán Cerro Quinceo y los depósitos de origen lacustre, las características geométricas de esta estructura se presentan en la Tabla 5.3. Nuevamente el bloque de piso se localiza hacia el NW con lo que el plano de falla interpretado en esta sección corresponde con el de la falla "La Colina". A partir del Perfil- 4 también se ha podido interpretar una familia de fracturas dentro de los depósitos volcánicos, las cuales pueden estar asociadas a los procesos de subsidencia (Figura 5.16).

Falla “La Colina” Calle Ma. Molina

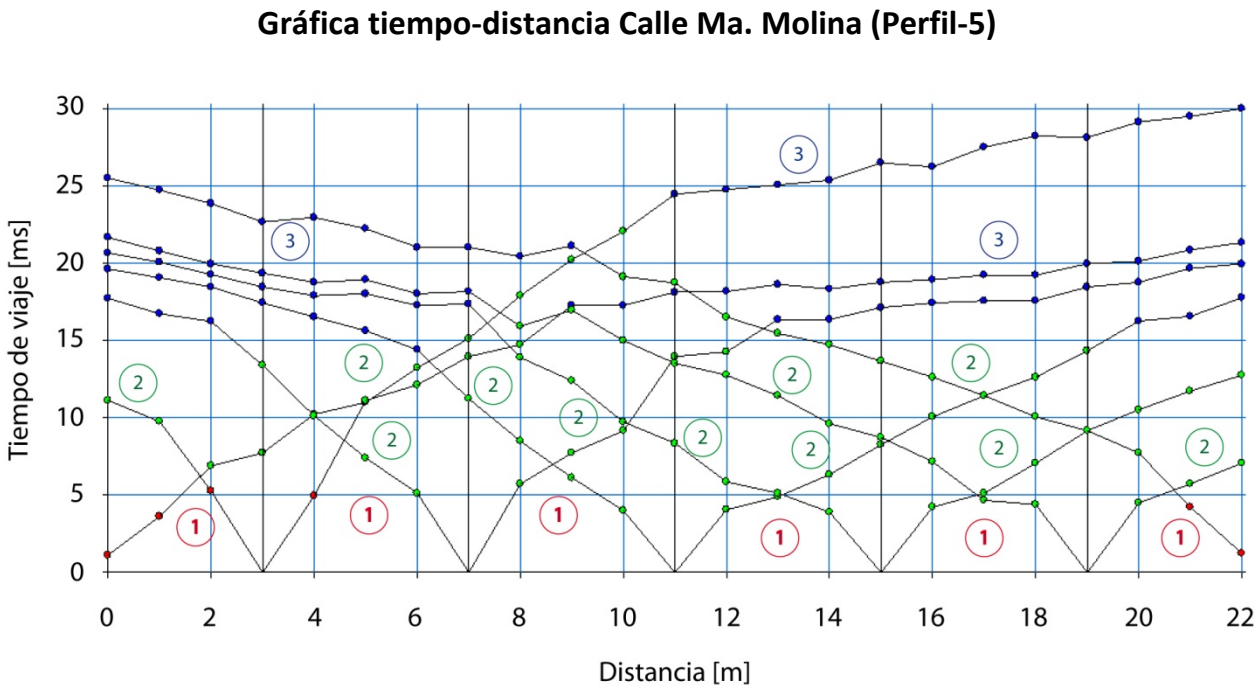

Figura 5.17- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-5 en el cual se observa nuevamente que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

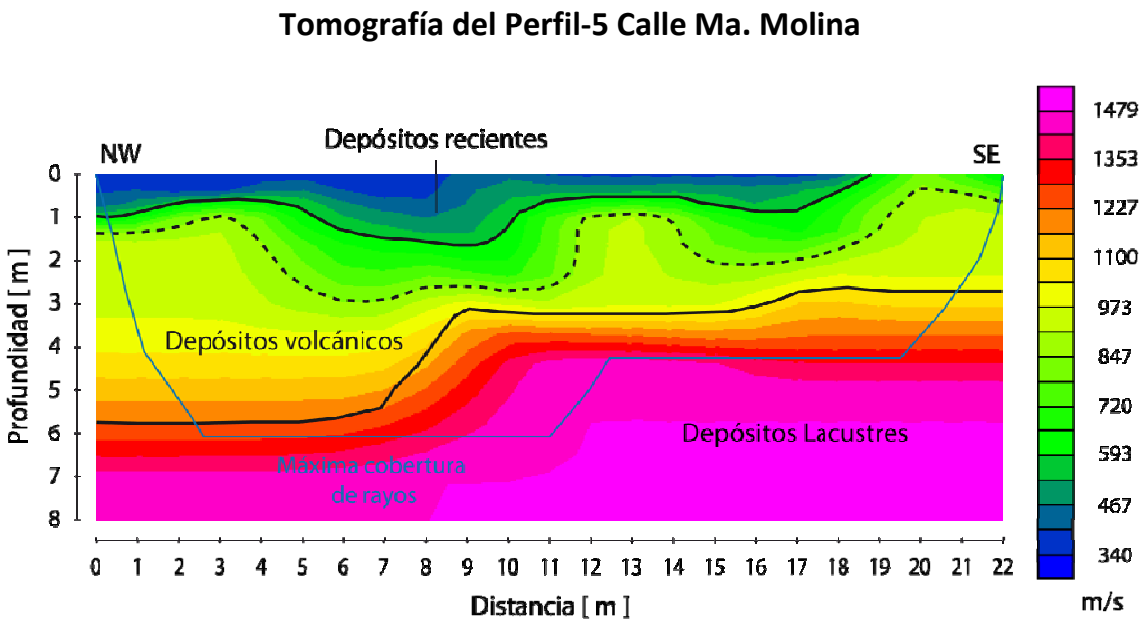

Figura 5.18- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-5, en esta sección la cobertura de rayos ha permitido definir la geometría de una falla de tipo normal, así como una serie de escalonamientos dentro de la unidad volcánica.

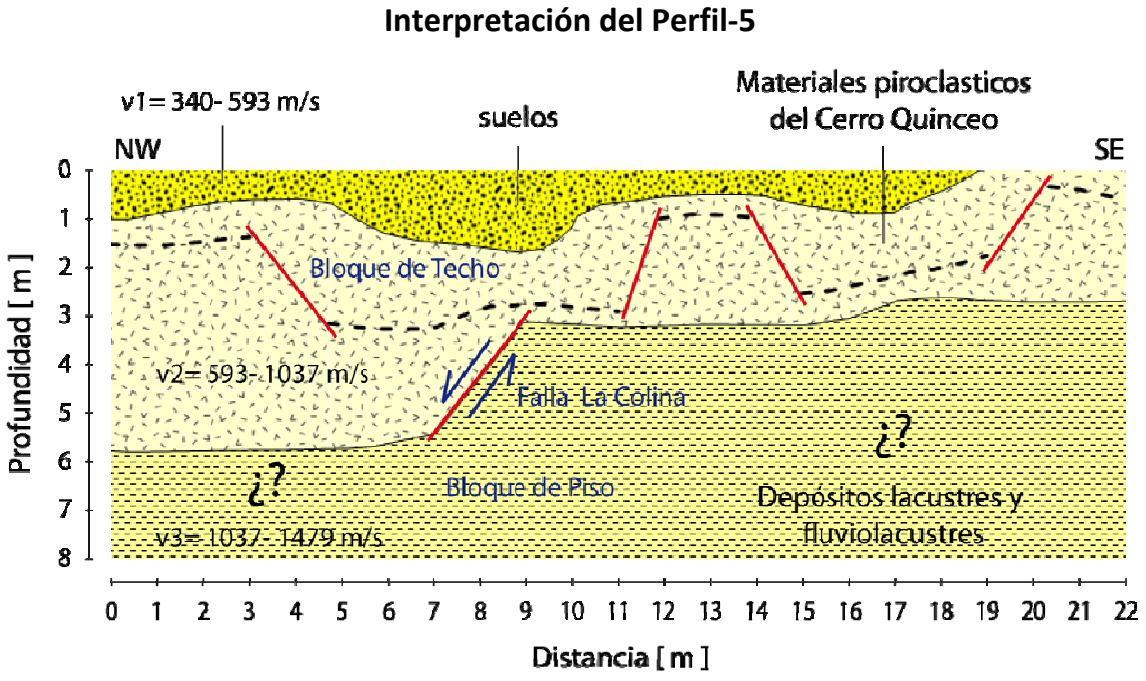

Figura 5.19- Interpretación de la sección sísmica, en esta sección se observan una serie de hundimientos de 2 y 4 m entre los depósitos de origen volcánico y los depósitos lacustres, además se también se aprecia que los depósitos volcánicos se encuentran fuertemente fracturados.

Interpretación del Perfil-5 realizado en la Calle Ma. Molina

En esta sección de velocidades sísmicas (Figura 5.18) se han logrado identificar 3 intervalos de velocidad, los cuales se han interpretado de la base hacia la cima como: sedimentos lacustres, materiales de origen volcánico y suelos junto con materiales compactados (Figura 5.19).

A partir del Perfil-5 se ha identificado un fallamiento, el cual pone en contacto discordante a los depósitos de origen volcánico con los sedimentos lacustres. Esta estructura ha provocado un desnivel significativo en la superficie, mismo que ha provocado daño en las estructuras de 2 casas habitación. El bloque de piso se localiza hacia el NW, sin embargo la geometría de la falla se aprecia claramente entre los metros 6 y 10 de la sección de velocidades sísmicas, por lo que este plano de falla puede asociarse al de la falla “La Colina”, en esta sección también se han podido identificar una serie de fracturamientos en los depósitos volcánicos los cuales se encuentran asociados a procesos de subsidencia (Figura 5.19).

Falla “Torremolinos” Calle Pedro Bermeo

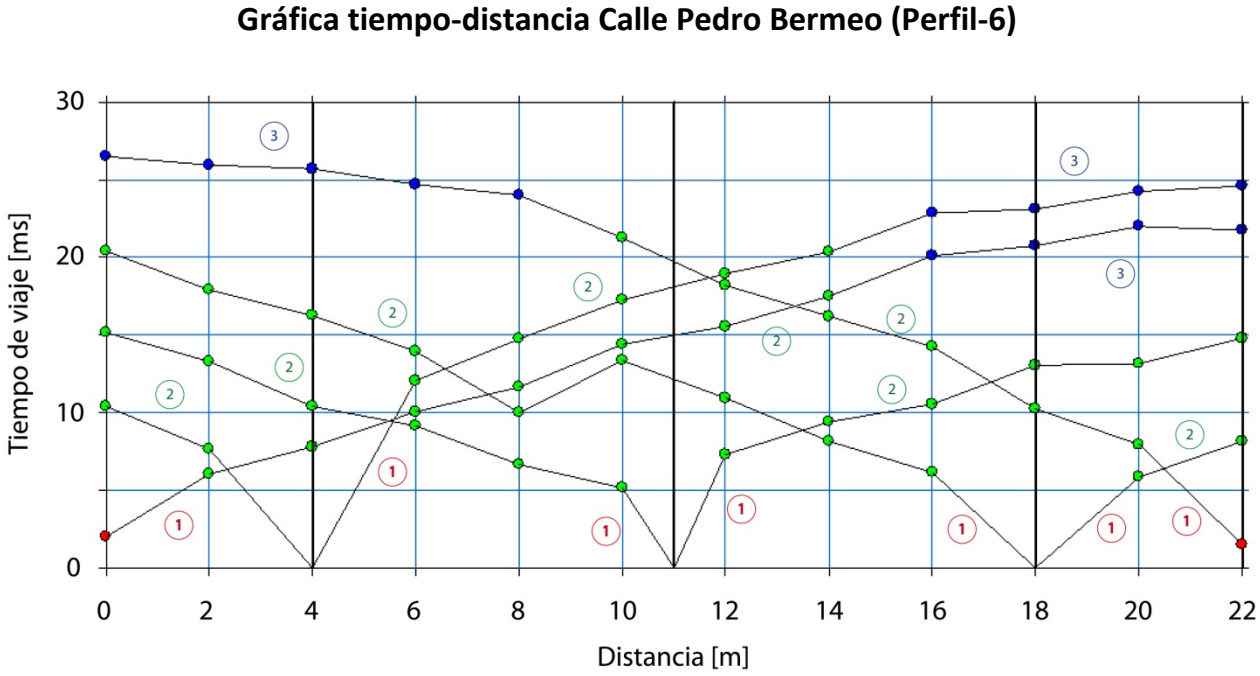

Figura 5.20- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-6 en el cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

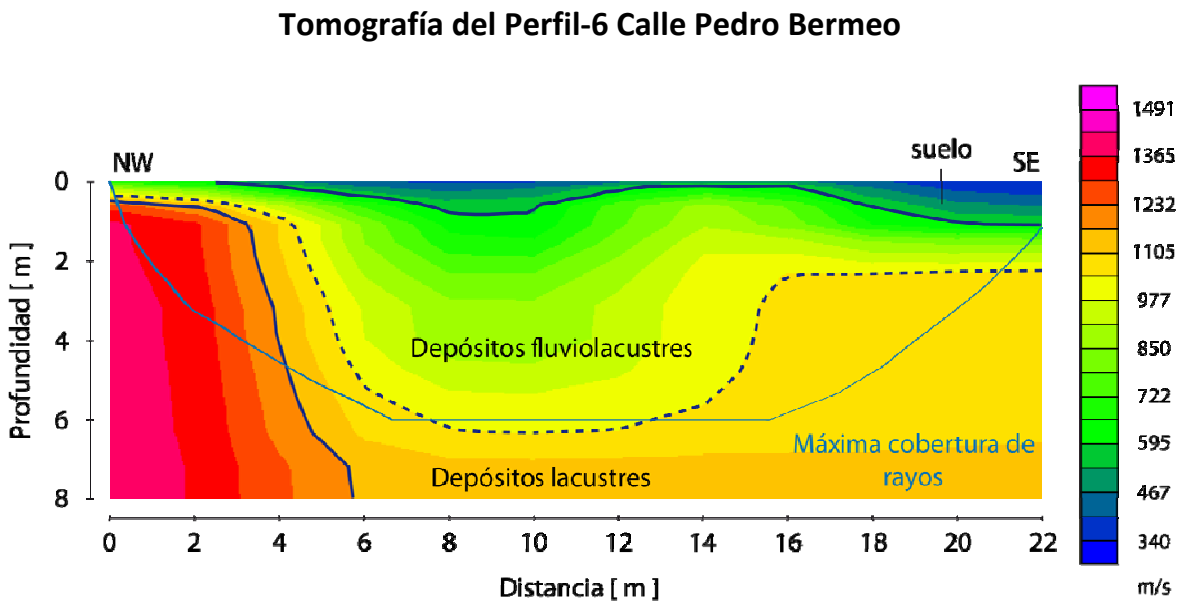

Figura 5.21- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-6, en esta sección la cobertura de rayos ha permitido definir la existencia de una falla, así como también

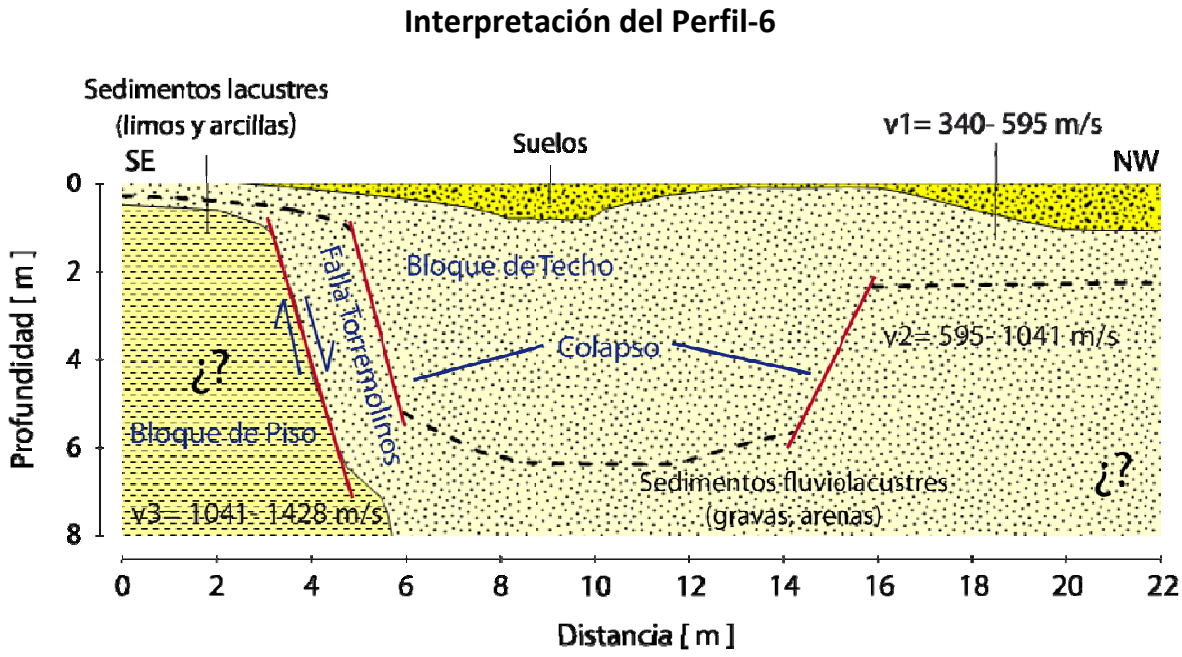

Figura 5.22- Interpretación de la sección sísmica, en la que se aprecia un desplazamiento de mas de 7 m entre los sedimentos de origen fluviolacustres y los sedimentos lacustres. En esta sección también se observa un posible colapso dentro de la unidad fluviolacustre.

Interpretación del Perfil-6 realizado en la Calle Pedro Bermeo

En esta sección se han identificado 3 intervalos de velocidad sísmica (Figura 5.21), el primero va de los 340 a 595 m/s, el segundo de 595 a 1105 m/s y el tercero de 1105 a 1491 m/s. De acuerdo con la columna estratigráfica de Morelia y estudios geotécnicos realizados cerca del área de estudio estos materiales se han podido interpretar de la base hacia la cima como: sedimentos lacustres, sedimentos fluviolacustres y suelos (Figura 5.22).

A partir de este Perfil-6 se identifico un salto de falla localizado entre los depósitos lacustres y los depósitos fluviolacustres de más de 3 metros de profundidad, las características geométricas de esta falla se presentan en la Tabla 5.4, en esta sección se observa que el bloque de piso se encuentra localizado hacia el NW con lo que el plano de falla de la sección corresponde con el de la falla "Torremolinos". En esta sección también se han identificado un sistema de fracturas encontradas, asociadas principalmente a los procesos de subsidencia, las cuales han originado un posible colapso dentro de los sedimentos fluviolacustres (Figura 5.22), los cuales ponen en grave riesgo las construcciones ubicadas sobre estas estructuras geológicas.

Falla “Torremolinos” Calle Luciano Navarrete

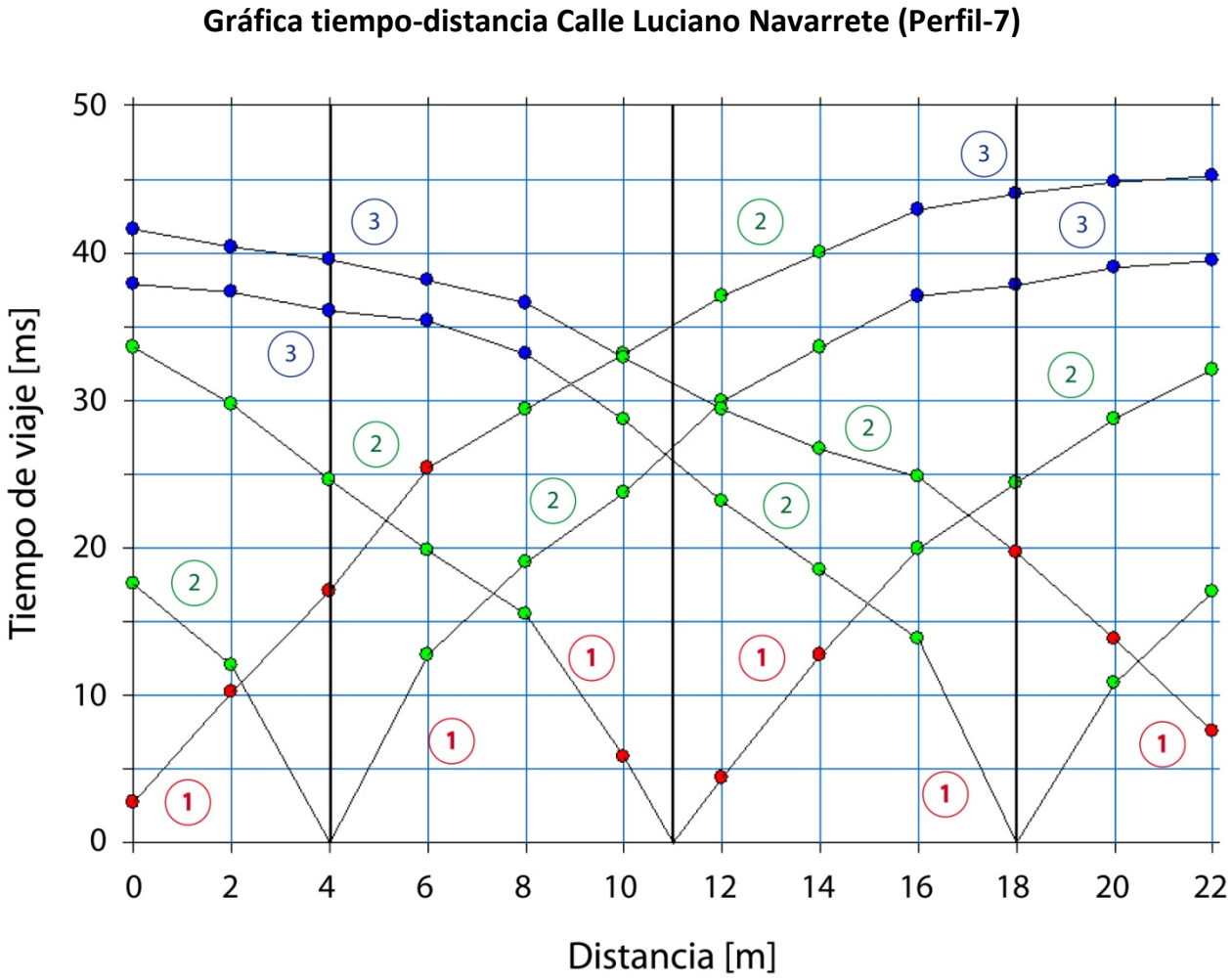

Figura 5.23- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-7 en el cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

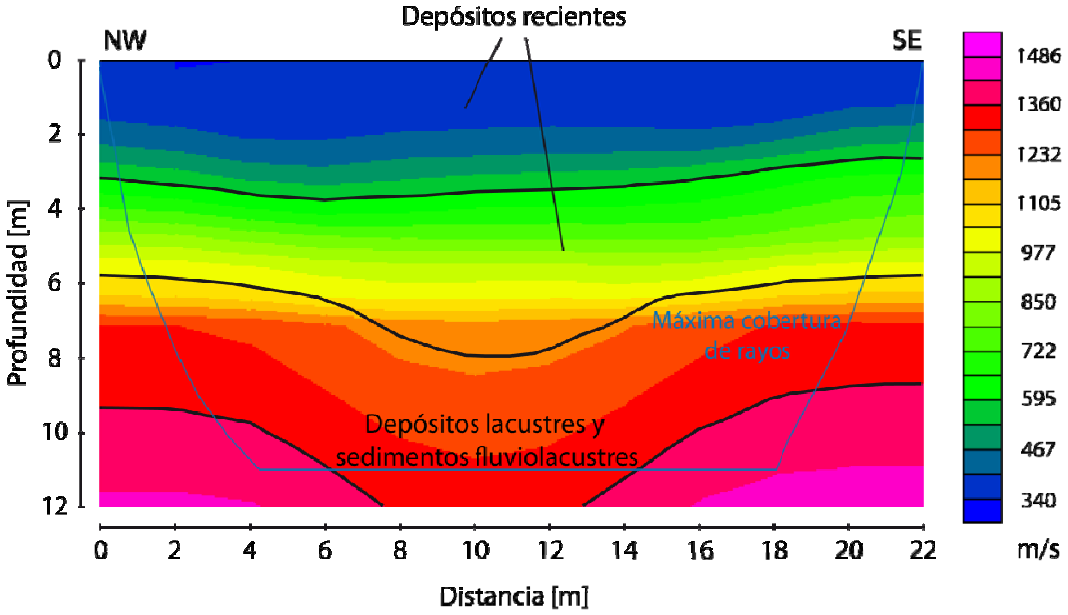

Figura 5.24- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-7, en esta sección la cobertura de rayos ha permitido definir el hundimiento diferencial sobre la unidad fluviolacustre.

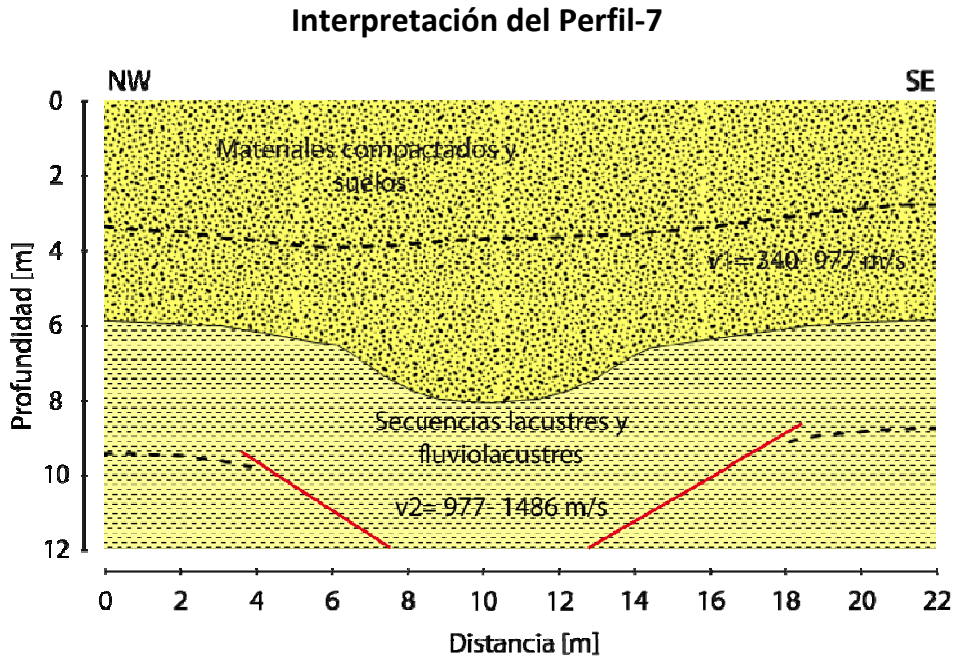

Figura 5.25- Interpretación de la sección sísmica en la que se observa el hundimiento sobre los depósitos lacustres y fluviolacustres posiblemente asociados a los procesos de subsidencia

Falla “Torremolinos” Calle Luciano Navarrete

Grafica tiempo-distancia Calle Luciano Navarrete (Perfil-8)

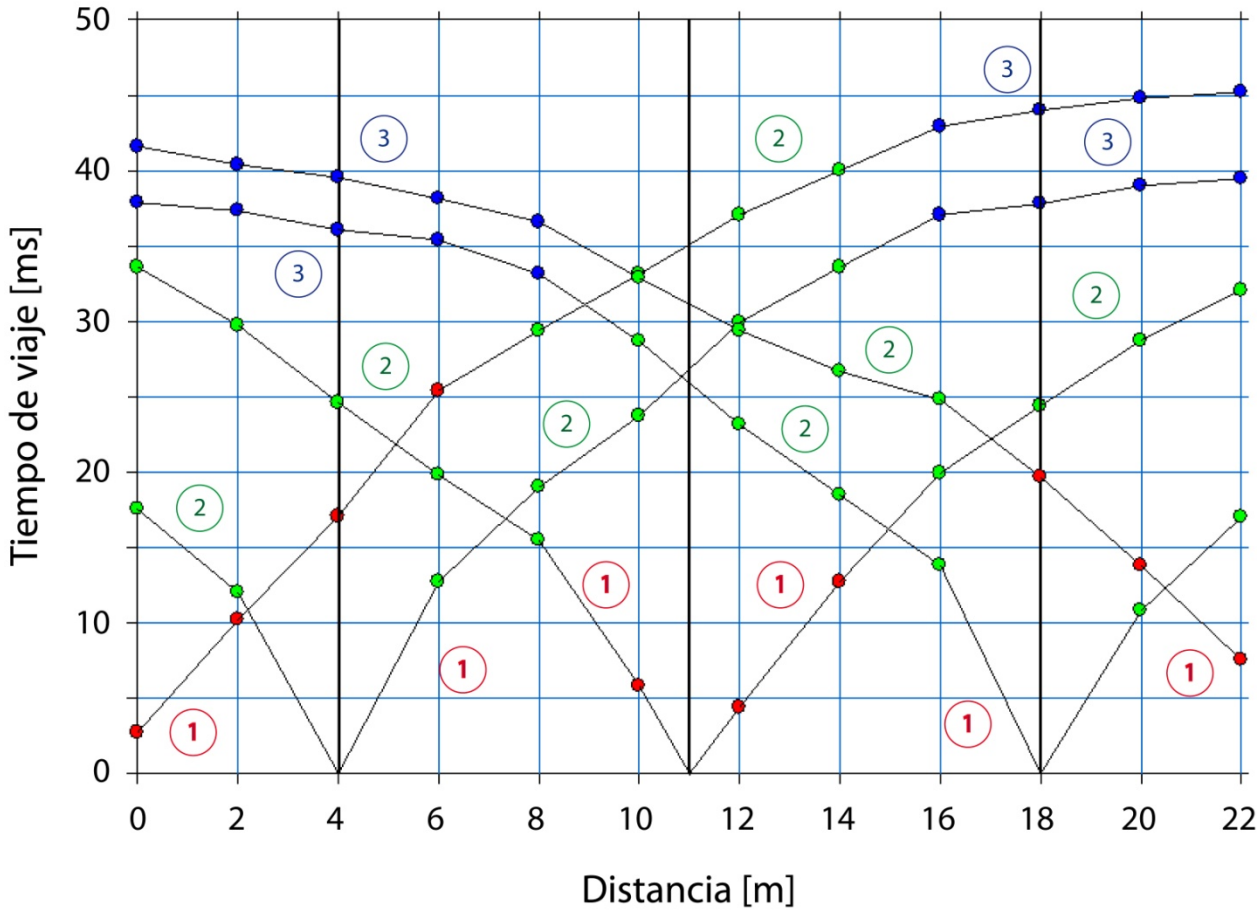

Figura 5.26- Curvas tiempo-distancia obtenidas a partir del Perfil-8 en el cual se observa que los tiempos medidos presentan en general una tendencia a tres capas.

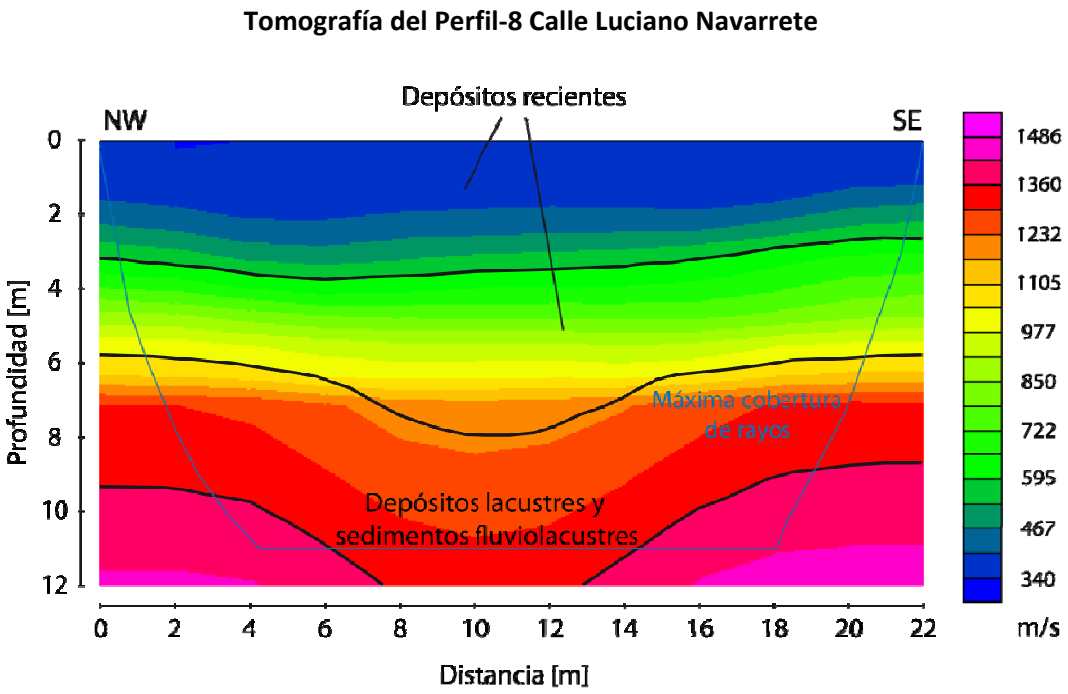

Figura 5.27- Sección de velocidades sísmicas correspondiente al Perfil-8, nuevamente en esta sección la cobertura de rayos ha permitido definir el hundimiento diferencial sobre la unidad fluviolacustre.

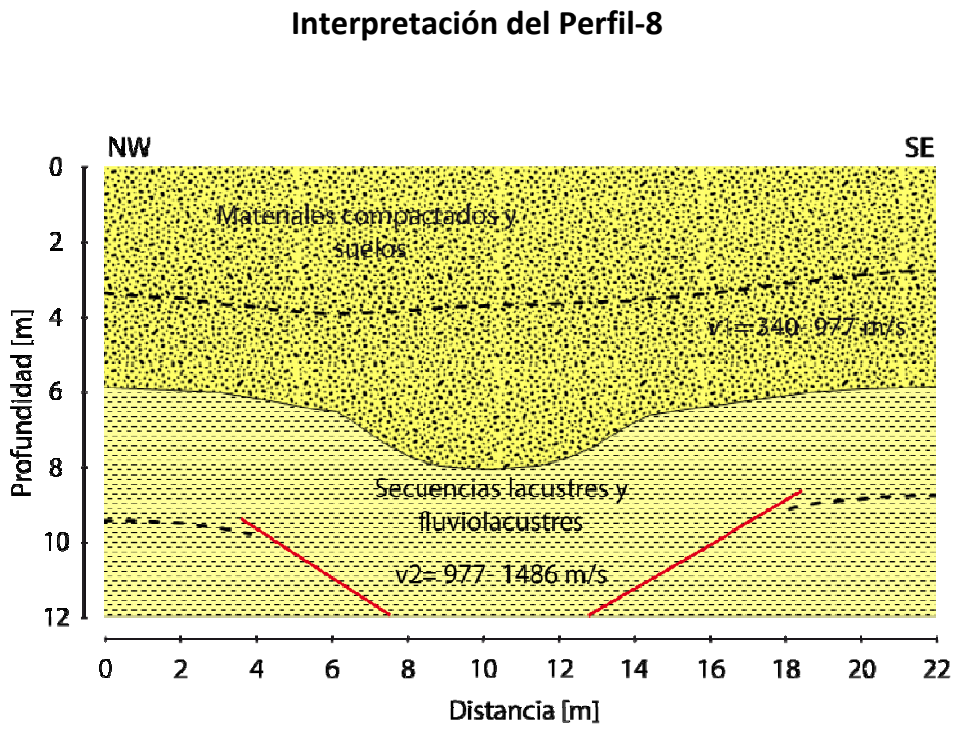

Figura 5.28- Interpretación de la sección sísmica en la que se observa el hundimiento sobre los depósitos lacustres y fluviolacustres, nuevamente asociados a los procesos de subsidencia.

Interpretación de los Perfiles 7 y 8 realizados en la Calle Luciano Navarrete

Las dos secciones sísmicas obtenidas para el área de estudio ubicada sobre la calle Luciano Navarrete (Figuras 5.24 y 5.27) se han podido interpretar de acuerdo con los intervalos de velocidad sísmica presentados, estudios geotécnicos realizados cerca del área de estudio, y la columna estratigráfica de la ciudad de Morelia, dos tipos de materiales que corresponden a suelos y depósitos fluviolacustres.

Estructuralmente las secciones presentan geometrías similares, las cuales se han interpretado como hundimientos diferenciales (Figuras 5.25 y 5.28), dichos hundimientos probablemente son provocados por los procesos de subsidencia y pueden considerarse como potencialmente dañinos ya que de continuar los procesos de subsidencia mencionados, el área de influencia de estos hundimientos puede extenderse provocando un gran daño en las obras civiles localizadas sobre estas estructuras geológicas.

A continuación se presentan una síntesis de las características geométricas interpretadas a partir de las secciones sísmicas obtenidas durante el estudio de prospección sísmica realizado en el área de Morelia sobre las fallas la Colina (Tabla 5.3) y Torremolinos (Tabla 5.4).

FALLA "LA COLINA"						
Nº de Perfil	RMS [ms]	Zona de influencia [m]	Estructuras geológicas	Tipo de Falla	Rumbo	Echado
Perfil 1	8.89	Lateral: 24 Profundidad: 8	Fracturas	---------	----	---------
Perfil 2	7.18	Lateral: 19 Profundidad: 8	Fallas	Normal	NW	30º SE
Perfil 3	2.56	Lateral: 8 Profundidad: 3.5	Falla	Normal	NW	45º SE
Perfil 4	3.12	Lateral: 18 Profundidad: 4	Falla y fracturas	Normal	NW	26º SE
Perfil 5	2.27	Lateral: 23 Profundidad: 6	Fallas y fracturas	Normal	NW	41º SE

Tabla 5.3- Interpretación de los perfiles ubicados a lo largo del área de influencia de la falla "La Colina" en la Ciudad de Morelia, Michoacán.

FALLA "TORREMOLINOS"						
Nº de Perfil	RMS [ms]	Zona de influencia [m]	Estructuras geológicas	Tipo de Falla	Rumbo	Echado
Perfil 6	4.30	Lateral: 18 Profundidad: 8	Fallas y fracturas	Normal	NW	74º SE
Perfil 7	3.34	Lateral: 14	Fracturas	---------	------	---------
Perfil 8	3.40	Lateral: 12.6	Fracturas	---------	------	---------

Tabla 5.4- Interpretación de los perfiles realizados a lo largo del área de influencia de la Falla "Torremolinos" en la Ciudad de Morelia, Michoacán.

6. CONCLUSIONES

En esta tesis se han expuesto los modelos de velocidades sísmicas obtenidos mediante el método de tomografía de refracción sísmica, este método se ha utilizado en los casos de estudio de San Miguel Tocuila, Estado de México y la Ciudad de Morelia, Michoacán de Ocampo; con el objetivo de mostrar la aplicabilidad y potencialidad del método para coadyuvar en la solución de problemas de administración de uso de suelo.

Estos modelos de velocidades sísmicas han permitido interpretar y caracterizar estructuras arqueológicas en la zona de estudio de San Miguel Tocuila, así como también estructuras geológicas (fallas y fracturas) en la Ciudad de Morelia. Las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de tomografía de refracción sísmica en los casos de estudios se presentan a continuación.

San Miguel Tocuila, Estado de México

En este primer caso de estudio se han logrado delimitar la geometría en el subsuelo de dos estructuras bien definidas en forma de montículo, cuyas geometrías erosionadas se han interpretado como posibles reminiscencias de estructuras en forma de tlatel, los modelos de velocidad sísmica a partir de los cuales se han interpretado estas dos estructuras también han permitido documentar y proporcionar una visión clara de la disposición espacial (localización, distribución y profundidad) a la que se encuentran dichas estructuras en el subsuelo.

Uno de los resultados obtenidos a partir del uso de este método, en este primer caso de estudio, ha sido la identificación de una estructura geológica geométricamente idéntica a la del depósito paleontológico ubicado en el actual museo de Tocuila, debido a la cercanía que existe entre estas dos estructuras podemos concluir que se trata del mismo flujo de lodo volcánico que sepulto a los mamuts con lo que podemos considerar que existe una gran posibilidad de que en este sitio existan restos paleontológicos de megafauna.

Ciudad de Morelia, Michoacán de Ocampo

En este segundo caso de estudio se han logrado identificar, delimitar y definir las características de continuidad de la traza en superficie de las fallas "La Colina" y "Torremolinos", a partir de las secciones sísmicas obtenidas se ha podido determinar el área de influencia tanto lateralmente como a profundidad de estas dos fallas a lo largo de los sitios de estudio. De las secciones sísmicas se identifico claramente la geometría de las fallas en el subsuelo de donde se ha podido obtener y documentar los datos geométricos de las fallas estudiadas tales como el tipo de falla, el salto, rumbo y buzamiento.

Finalmente los resultados obtenidos en ambos casos de estudio han demostrado que el método de tomografía de refracción sísmica posee una gran aplicabilidad y potencialidad para dar solución a problemas de administración y uso de suelo ya que en el caso de las estructuras arqueológicas de Tocuila hemos podido definir claramente la geometría de dichas estructuras mientras que en el caso de estudio de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia nos han permitido visualizar claramente la geometría de las fallas geológicas en el subsuelo de tal manera que podemos extraer información muy valiosa y precisa a partir de la interpretación de las secciones sísmicas de tomografía.

APENDICE A: CONCEPTOS Y PRINCIPIOS FUNDAMENTALES DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Cuando un esfuerzo es aplicado a un medio elástico o cuando un esfuerzo es liberado repentinamente dentro de un medio, la energía mecánica correspondiente se propaga hacia el exterior como una onda elástica (Sharma, 2002). Las ondas sísmicas son ondas elásticas que atraviesan un medio que puede ser o no homogéneo y por lo tanto es posible estudiarlas bajo los mismos conceptos y principios que rigen la propagación del movimiento ondulatorio (Del Valle, 2008) mismos que se describen a continuación.

Frente de Onda

Se conoce como frente de onda a la superficie imaginaria que une a todos los puntos en el espacio que se alcanzan en un mismo instante por una onda que se propaga a través de un medio (Figura A1). La línea perpendicular a un frente de onda en cualquier punto se denomina rayo, siendo también la dirección de propagación de la onda en ese instante (Parasnis, 1997).

Principio de Huygens

De acuerdo con este principio, todos los puntos de un frente de onda se pueden considerar como centros emisores de ondas esféricas secundarias, las cuales viajan radialmente hacia el exterior desde los puntos emisores (Figura A1). Después de un tiempo *t* la nueva posición del frente de onda será la superficie tangencial a esas ondas secundarias (Holliday, 1977).

Principio de Fermat

Establece que el rayo llega a un punto dado desde una fuente determinada a través de una trayectoria de "tiempo mínimo" entre el punto y la fuente, la cual dependerá de la distribución de la velocidad en el medio (Del Valle, 2008).

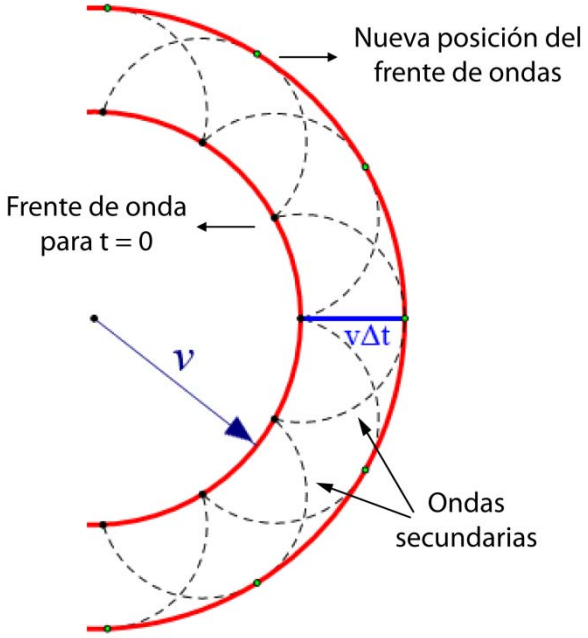

Figura A1- Propagación de una onda esférica a través de un medio homogéneo, de acuerdo con la construcción geométrica de Huygens (Modificada de Liang, 2005).

Ley de Snell

Cuando un frente de onda incide sobre una interfase entre dos medios con diferentes propiedades elásticas (densidad, rigidez, incompresibilidad, etc.), parte de la energía es reflejada dentro del medio original, y parte de la energía es transmitida dentro del segundo medio (Sheriff, 1995). En la interfase, el frente de onda transmitido sufre un cambio en la dirección de propagación, es decir, se refracta. Las relaciones que existen

entre las direcciones del frente de onda en cada medio son descritas por la ley de Snell, la cual se describe a continuación.

La ley de Snell es una consecuencia del principio de Fermat, aunque esta fue descubierta en primera instancia de forma experimental (Del Valle, 2008). Esta ley establece, en su forma más general, que una onda que atraviesa el límite entre dos medios con velocidades v_1 y v_2, como se muestra en la Figura A2

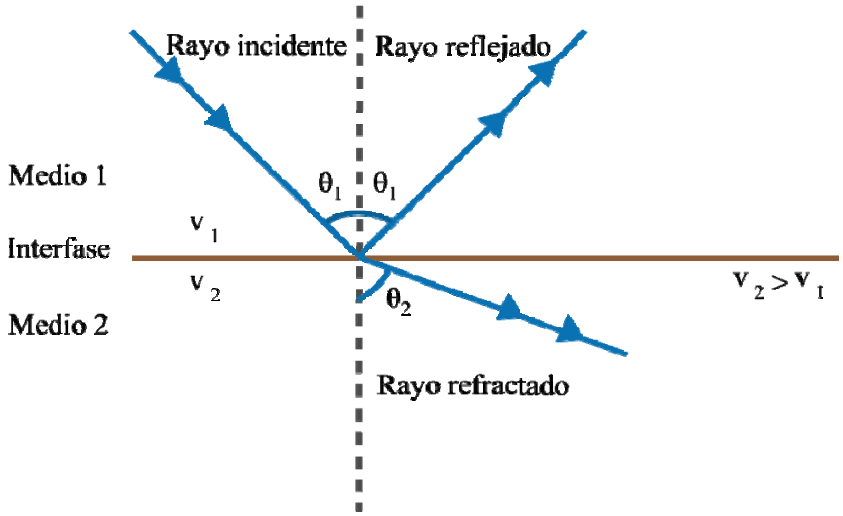

Figura A2- Rayos reflejados y refractados asociados con un rayo que incide oblicuamente sobre una interfase entre dos medios con propiedades elásticas distintas (Modificada de Nettleton, 1976).

Se refracta de tal forma que:

$$\frac{sen\theta_1}{v_1} = \frac{sen\theta_2}{v_2} \qquad \text{ó bien} \qquad \frac{sen\theta_1}{sen\theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

En donde θ_1 y θ_2 son los ángulos entre la normal a la interfase y los rayos en el medio con velocidades v_1 y v_2 respectivamente (Nettleton, 1976).

Refracción Crítica

Cuando la velocidad es mucho mayor en el medio inferior existe un ángulo de incidencia conocido como ángulo crítico, para el cual el ángulo de refracción es 90º. Esto da lugar a que el rayo refractado críticamente viaje a lo largo de la interfase a la velocidad más alta, en este caso la del medio inferior v_2. El ángulo critico esta dado por:

$$\frac{sen\,\theta_c}{v_1} = \frac{sen\ 90^o}{v_2} = \frac{1}{v_2}$$

Por lo que

$$\theta_c = sen^{-1}\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

Para cualquier ángulo de incidencia mayor que θc, se deduce que no existe un rayo refractado en el segundo medio y por consecuencia tampoco existe un rayo que penetre en ese medio. Toda la energía que incide con ese ángulo (θc) se refleja, y para ángulos mayores que el ángulo crítico tendremos reflexión interna total (Nettleton, 1976).

Head wave

El paso del rayo crítico refractado a lo largo de la superficie superior de la capa inferior causa una perturbación en la capa superior que viaja hacia adelante a la velocidad v_2, la cual es mayor que la velocidad de la capa superior v_1 (Figura A3). La situación es análoga a aquella en la que un proyectil viajando a través del aire a una velocidad mayor que la del sonido, genera una onda de choque. En la exploración sísmica esta onda es

conocida como *head wave*, y pasa de un modo oblicuo a través de la capa superior hacia la superficie, como se muestra en la Figura A3.

Cualquier rayo asociado con esta onda de choque presenta una inclinación igual al ángulo crítico (θ_c). Gracias a la onda de choque, la energía sísmica regresa a la superficie después de una refracción crítica en una capa situada por debajo y con una mayor velocidad (Kearey, 2002)

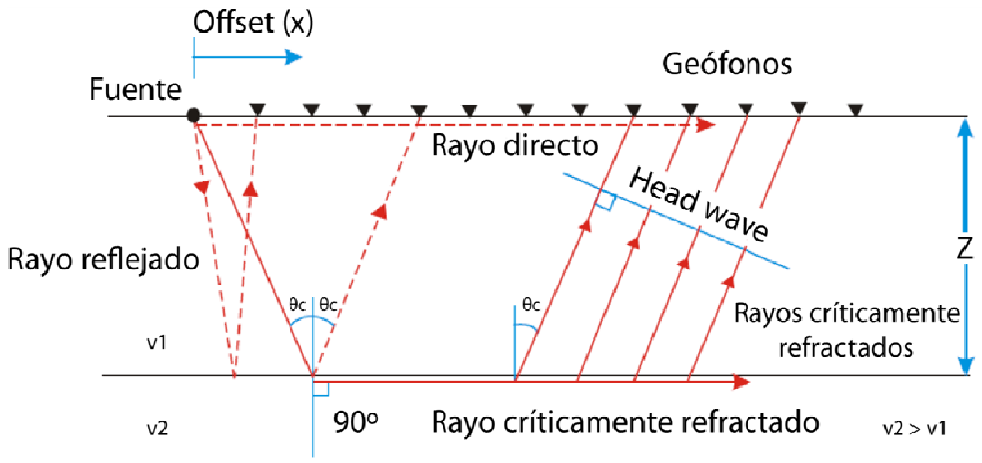

Figura A3- Diagrama de las respectivas trayectorias tomadas por los rayos directo, reflejado y refractado a través de un medio homogéneo (Modificada de Reynolds, 2002).

APENDICE B: VELOCIDAD SÍSMICA

El parámetro físico utilizado durante los estudios de exploración sísmica, es la velocidad a la cual se propaga la energía de las ondas sísmicas a través de las distintas unidades geológicas que componen el subsuelo (Tabla A1). En el método de refracción sísmica la velocidad a la que se propaga la energía de la onda P es la más importante así como también la base de la interpretación y modelación de datos sísmicos de refracción, mientras que en los métodos de reflexión sísmica pueden ser utilizadas las velocidades de las ondas P y S (Lankson, 1990).

	V_P [km s^{-1}]		V_P [km s^{-1}]
Rocas Ígneas		*Rocas sedimentarias*	
Basalto	5.2 – 6.4	Yeso	2.0 – 3.5
Gabro	6.5 – 6.7	Limolita	2.8 – 7.0
Granito	5.5 – 6.1	Arenisca	1.4 – 4.4
		Lutita	2.1 – 4.4
Rocas Metamórficas		*Materiales no consolidados*	
Gneiss	3.7 – 7.0	Aluvión	0.3 – 0.6
Mármol	3.7 – 6.9	Arenas y Gravas	0.3 – 1.8
Cuarcita	5.6 – 6.1	Arcilla húmeda	1.5 – 2.0
Esquisto	3.5 – 5.7	Arcilla seca	2.0 – 2.4

Tabla A1- Velocidad de ondas compresionales en algunas rocas comunes (Modificada de Bell, 2007).

La velocidad es una función de la densidad del material, ya que las observaciones empíricas han mostrado que la velocidad de un material más denso es generalmente mayor que la velocidad de un material menos denso. La velocidad de un material en particular puede variar de manera muy amplia, en función de su edad, de su profundidad, de su grado de fractura o porosidad, su grado de intemperismo y el agua o el aire contenido en los poros (Lankson, 1990).

BIBLIOGRAFÍA

Arciniega-Ceballos, A., Hernández-Quintero, E., Cabral-Cano, E., 2009. Shallow Geophysical Survey at the Archaeological Site of San Miguel Tocuila, Basin of Mexico. Journal of Archaeological Science, 30, p. 1-7.

Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, Paolo., 2002. Análisis Geomecánico de la Inestabilidad del Escarpe La Paloma en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 19 (2), p. 91-106.

Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., 2006. Hundimientos Ocasionados por Procesos de Subsidencia-Creep-Falla (PSCF) en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Geotermia, 19 (2), p. 50-59.

Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., 2008. A GPR Study of Subsidence-Creep-Fault Processes in Morelia, Michoacán, México. Engineering Geology, 100, p. 69-81.

Barba, L., 2003. The Geophysical Study of Buried Archaeological Remains and the Preservation of the Architectural Patrimony of Mexico City. CIPA XIX International Symposium Heritage Documentation, Antalya, Turkey.

Bell, F. G., 2007. Engineering Geology: Elsevier Ltd, p. 349.

Cantos, J., 1972. Tratado de Geofísica Aplicada: Librería de Ciencia Industria, p. 246-248.

Del Valle Toledo, E., 2007. Apuntes de la signatura de Prospección Sísmica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, p.

Garduño-Monroy, V.H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., 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, 18 (1), p. 37-54.

Gonzales, S., Morett-Alatorre, L., Huddart, D., 2006. Mammoths from the Basin of Mexico: Stratigraphy and Radiocarbon Dating. El hombre temprano en América y sus implicaciones en el poblamiento de la Cuenca de México. Simposio Internacional Instituto Nacional de Antropología e Historia. Colección Científica 500, p. 263-274.

Hayashi, K., Takahashi, T., 2001. High Resolution Seismic Refraction Method Using Surface and Borehole Data for Site Characterization of Rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 38, p. 807-813.

Holliday, D., Resnick, R., 1977. Física (Tomo II). Wiley, Jonh & Sons Incorporated, p. 1420-1421.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2002. An Introduction to Geophysical Exploration: Wiley, Jonh & Sons Incorporated, p. 99-118.

Lankston, R. W., 1988. High Resolution Refraction Seismic Methods, Proc. of Symp. on the Application of Geophys. to Engr. and Envr. Problems, 349-387.

Lozano-Garcia, M., Ortega-Guerrero, Beatriz., 1998. Late Quaternary environmental changes of the central part of the basin; correlation between Texcoco and Chalco basins. Review of Paleobotany and Palynology, 99, p. 77-93.

Mason, I. M., 1981. Algebraic Reconstruction of a Two-Dimensional Velocity Inhomogeneity in the High Hazles Sean of Toresby Collery. Geophysics, 46, p. 298-308.

Morales, R., Piñón, N., Álvarez, A., 1990, Resistividades en el Ex-Lago de Texcoco. Simposio Sobre Tópicos Geológicos de la Cuenca del Valle de México, Sociedad Mexicana de Mecánica de suelos, p. 61-77.

Morett-Alatorre, L., Arrollo-Cabrales, J., 2003. El Yacimiento Paleontológico de Tocuila. Universidad Autónoma de Chapingo, p. 3-33.

Noguera-Auza, E., 1975. Identificación de una Saladera. Anales de Antropología, 12 (1), p. 1112-1124.

Ozasuwa, I. B., Chinedu, A. D., 2008. Seismic Refraction Tomography Imaging of High-Permeability Zones Beneath and Earthen Dam, in Zaria Area, Nigeria. Journal of applied Geophysics, 66, p. 44-58.

Parasnis, D. S., 1986. Principles of Applied Geophisycs: Chapman & Hall, p.

Parsons, J. R., 1971. Prehistoric Settlement Patterns in the Texcoco region, Mexico. Memoirs of the Museum of Anthropology. University of Michigan. Number 3.

Pisanu, W., Ronnachai, P., Napakom S., 2009. Seismic Refraction Tomography of Mae-Hia Landfill Sites, Mueang District, Chang Mai. World Academy of Science, Engineering and Technology, 56, p. 678-681.

Redpath, B., 1973. Seismic Refraction Exploration for Engineering Site Investigations. Excavations Research Laborarory, Livermore, CA.

Rodríguez-Castillo, R., Rodríguez-Velásquez, I., 2006. Consecuencias Sociales de un Desastre Inducido, Subsidencia. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVIII (2), p. 265-269.

Russell, B., 1988. Introduction to Seismic Inversion Methods; Course Notes Series, nº 2: S. N. Domenico, Series, p.

Sheehan, J., Doll, W., Mandell, W., 2005. An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 10 (1), p. 21-34.

Sheriff, R. E., Geldart, L. P., 1995. Exploration Seismology: Cambridge University Press, p. 1-3.

Siebe, C., Schaff, P., Urrutia-Fucugauchi., 1999, Mammoth bones embedded in a late Pleistocene lahar from Popocatépetl volcano, near Tocuila, central México. Geological Society of American Bulletin, 111 (10), p. 1550-1562.

Worthington, M. H., Mason, I. M., Wheller, P. M., 1983. Application of Seismic Tomography to Mineral exploration. Institution of Mining and Metallurgy Transactions, 92, p. B209- B213.

White, D. J., 1989. Two-Dimensional Seismic Refraction Tomography. Geophysical Journal, 97, p. 223-245.