



CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**“INTERACCIÓN FRACTURAMIENTOS SISMICIDAD EN ZONAS DE
SUBSIDENCIA”**

PRESENTA:

Sergio Daniel Chávez Salas

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL
CON ESPECIALIDAD EN ESTRUCTURAS**

TUTOR:

Dr. Jesús Pacheco Martínez

COMITÉ TUTORIAL:

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

Dra. Silvia Rodríguez Narciso

Aguascalientes, Ags. Mayo de 2021

AUTORIZACIONES

Dr. en C.T.C. Héctor Homero Posada Ávila
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

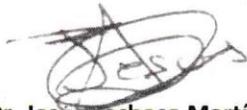
PRESENTE

Por medio del presente como **Miembros del Comité Tutorial** designado del estudiante **SERGIO DANIEL CHÁVEZ SALAS** con ID **266324** quien realizó la tesis titulado: : **INTERACCIÓN FRACTURAMIENTOS SISMICIDAD EN ZONAS DE SUBSIDENCIA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia damos nuestro consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que nos permitimos emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

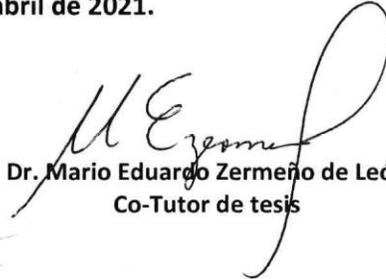
Ponemos lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, le enviamos un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 28 de abril de 2021.



Dr. Jesús Pacheco Martínez
Tutor de tesis



Dr. Mario Eduardo Zermeño de León
Co-Tutor de tesis



Dra. Silvia Rodríguez Narciso
Asesor de tesis

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado



DICTAMEN DE LIBERACIÓN ACADÉMICA PARA INICIAR LOS TRÁMITES DEL EXAMEN DE GRADO



Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 11/05/2021

NOMBRE: Sergio Daniel Chávez Salas ID: 266324

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería civil LGAC (del posgrado): Aplicación de las Ciencias de la Tierra a proyectos de Ingeniería

TIPO DE TRABAJO: (X) Tesis () Trabajo Práctico

TÍTULO: INTERACCIÓN FRACTURAMIENTOS SISMICIDAD EN ZONAS DE SUBSIDENCIA

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Los resultados ayudarán a entender la relación que hay entre los fracturamientos superficiales y el peligro sísmico para la prevención de sus riesgos

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
N.A.				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NO				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Si X
No

FIRMAS

Elaboró:

* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

* En caso de conflicto de intereses, tendrá un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, firmado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Alejandro Acosta Collazo

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Dr. en C. T. C. Héctor Homero Rosado Ayala

Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: "Cuidar la eficiencia operacional del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

Elaborado por: D. Apoyo al Posg.
Revisado por: D. Control Escolar/D. Gestión de Calidad.
Aprobado por: D. Control Escolar/ D. Apoyo al Posg.

Código: DO-SE-FO-11
Actualización: 01
Emisión: 28/04/20

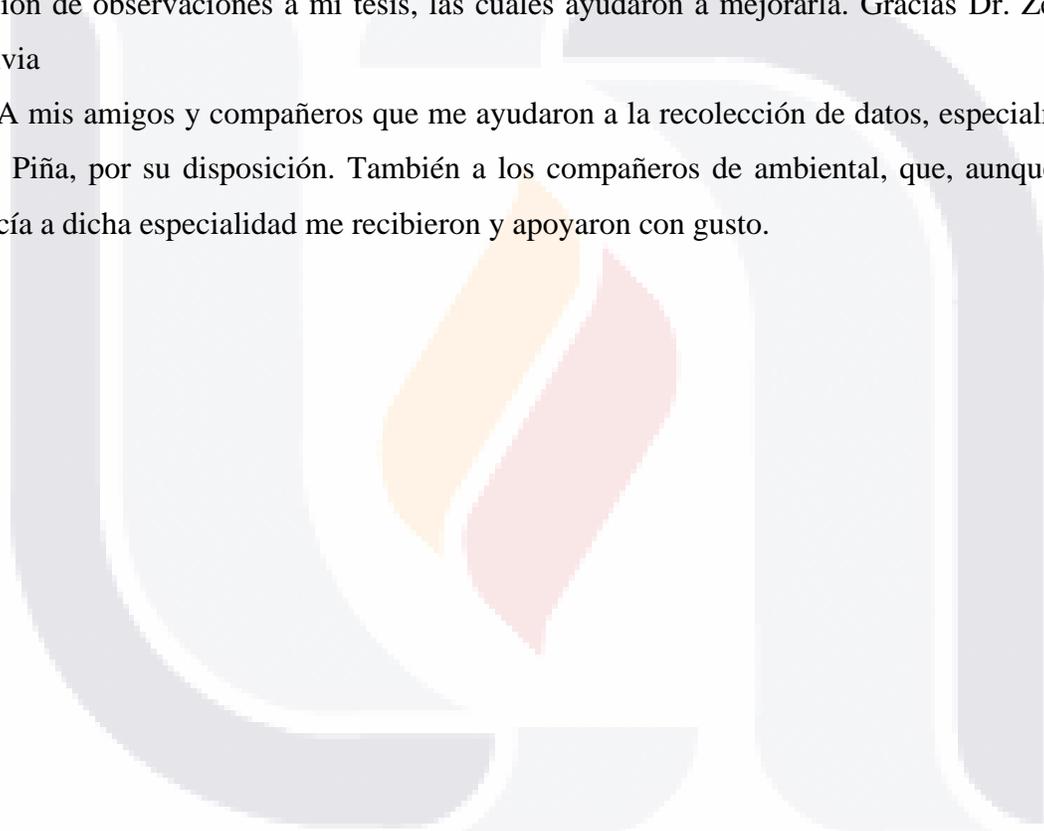
AGRADECIMIENTOS

A CONACyT por otorgarme una beca con la cual fue posible realizar mis estudios de maestría.

A mi tutor el Dr. Jesús Pacheco Martínez, por ayudarme y orientarme en el camino para la elaboración de este trabajo, así como por sus consejos. Gracias por la disponibilidad de tiempo y confianza que me otorgo, además por el buen trato y la paciencia al momento de compartir su conocimiento.

A mi comité tutorial y a mis sinodales, por dedicarle parte de su tiempo a la revisión y realización de observaciones a mi tesis, las cuales ayudaron a mejorarla. Gracias Dr. Zermeño, Dra. Silvia

A mis amigos y compañeros que me ayudaron a la recolección de datos, especialmente a Hugo y Piña, por su disposición. También a los compañeros de ambiental, que, aunque yo no pertenecía a dicha especialidad me recibieron y apoyaron con gusto.



DEDICATORIAS

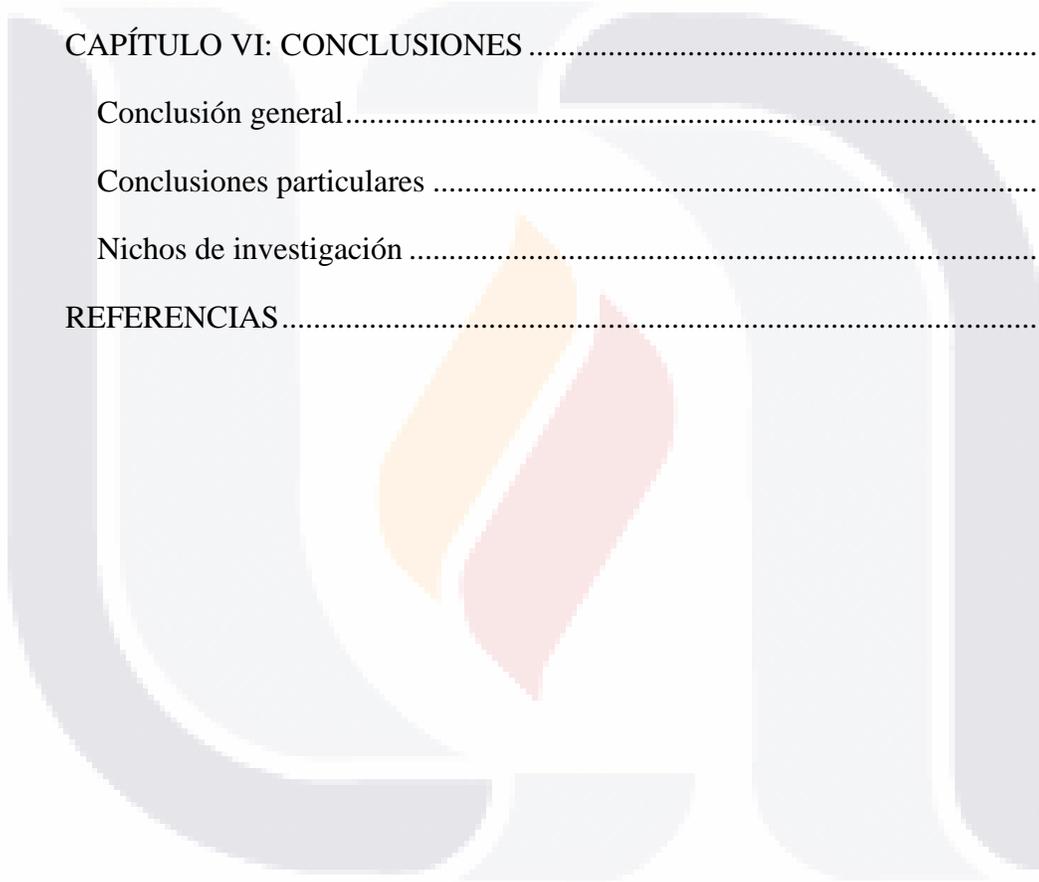
A mi familia, mi esposa que siempre me apoyo y me alentó a seguir adelante y siempre estuvo a mi lado, a mi pequeño hijo que, aunque al principio de este proyecto él no estaba aún, ahora es un motivo más para la culminación de esta etapa. A mis papas que siempre estuvieron ahí cuando los necesite, a mis hermanos, especialmente a Oscar por compartir sus fines de semana conmigo para disfrutar y conversar.



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE TABLAS	3
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1 Objetivo general	11
1.2 Objetivos particulares.....	11
1.3 Pregunta de investigación	11
1.4 Alcances	11
1.5 Justificación.....	12
1.6 Hipótesis.....	12
1.7 Metodología	13
1.7.1 Resistividad eléctrica del terreno	14
1.7.2 Estudios sísmicos del terreno.	16
CAPÍTULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO	18
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	25
3.1 Subsistencia	25
3.1.1 Fracturamientos de terreno.....	27
3.2 Ondas sísmicas.....	28
3.2.1 Propagación de ondas sísmicas.....	29
3.2.2 Velocidad de propagación de ondas sísmicas.....	29
3.3 Leyes de atenuación.....	30

3.4 Peligro sísmico.....	34
3.5 Efecto de sitio.....	38
CAPITULO IV: RESULTADOS.....	40
4.1 Primera zona de estudio	40
4.2 Segunda zona de estudio	57
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	72
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	76
Conclusión general.....	76
Conclusiones particulares	76
Nichos de investigación	77
REFERENCIAS.....	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Separación de electrodos para SEV.....	14
Tabla 2 Ecuaciones de leyes de atenuación. Tomada de Moncayo Theurer, et al., (2017).....	33
Tabla 3 Datos obtenidos de los SEV.....	58
Tabla 4 Datos de SEV corregidos.....	59
Tabla 5 Datos de resistividad en calicatas	61



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Equipo para mediciones de resistividad eléctrica.....	14
Figura 2 a) cables para SEV y calicatas. b) cables para TER.	15
Figura 3 Equipo para mediciones sísmicas.....	16
Figura 4 (a) Trazo de las ondas p en un modelo lateralmente homogéneo. (b) Los tiempos de viaje de ondas P desde una profundidad de 5.5 km. Tomado y modificado de Cormier & Spudich (1984).	18
Figura 5 (a) Trazo de las ondas P en el modelo de zona de falla. (b) Los tiempos de viaje de ondas P desde una profundidad de 5.5 km en el modelo de zona de falla. Ambas para la falla de San Andrés. Tomado y modificado de Cormier & Spudich (1984).....	19
Figura 6 Comparación entre las velocidades del terreno registradas en las estaciones G06 y G07 de los terremotos de Morgan Hill (MH) y Loma Prieta (LP). Indicando con un corchete la probable amplificación de onda S en G06 no vista en G07 en el terremoto MH. Tomado de Spudich & Olsen (2001).	20
Figura 7 Interacción de las ondas elásticas con la fractura. La línea sólida negra, la estrella y el cuadrado indican la ubicación de la fractura, la fuente y el receptor, respectivamente. Tomada de De_Basabe, Sen, & Wheeler (2011).	21
Figura 8 Sismograma para la función fuente. La línea sólida negra corresponde al caso homogéneo (sin falla) y la línea de puntos al modelo de falla. Tomada de De_Basabe, Sen, & Wheeler (2011).	22
Figura 9 Efecto de subsidencia en el terreno. Tomado y modificado de Galloway, Jones, & Ingebritsen (1999).....	25
Figura 10 Configuración de basamento y tipos de fracturas. Tomado y modificado de Pacheco-Martínez, et al. (2011).	27
Figura 11 Tipos de ondas sísmicas. http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html	29
Figura 12 Procedimiento para evaluar el peligro sísmico. Tomada de García et al (2012).....	35

Figura 13 Amplitud de onda en roca y en sedimentos blandos.
<http://www.lis.ucr.ac.cr/239>.....38

Figura 14 Ubicación de la primera zona de estudio. Falla Vistas del Sol.....40

Figura 15 Distribución de TER en la primera zona de estudio.....41

Figura 16 Instalación de equipo para TER, primera medición. Falla Vistas del Sol.
42

Figura 17 Perfil de resistividad 01 Falla Vistas del Sol (FVDS).....42

Figura 18 Perfiles de resistividad 02 al 05 FVDS.....43

Figura 19 Perfiles de resistividad 06 al 09 FVDS.....44

Figura 20 Perfiles de resistividad 10 al 13 FVDS.....45

Figura 21 Perfiles de resistividad 14 al 17 FVDS.....46

Figura 22 Perfiles de resistividad 18 al 21 FVDS.....47

Figura 23 Perfiles de resistividad 22 al 25 FVDS.....48

Figura 24 Perfiles de resistividad 26 al 29 FVDS.....49

Figura 25 Perfil de resistividad 30FVDS.....50

Figura 26 Distribución de segunda parte de TER. Primera zona.....50

Figura 27 Afectación en pared aledaña.....51

Figura 28 Perfiles de resistividad 31 al 34 FVDS.....52

Figura 29 Distribución de los estudios MASW 1D en primera zona.....53

Figura 30 MASW 1D 1 y 2 FVSD.....53

Figura 31 MASW 1D 3 al 10 FVSD.....54

Figura 32 MASW 1D 11 al 18 FVSD.....55

Figura 33 Interpolación MASW 1D FVDS.....56

Figura 34 Ubicación de la segunda zona de estudio. Falla Aurero 1.....57

Figura 35 Distribución de los diferentes estudios en la segunda zona de análisis....58

Figura 36 SEV modelos ajustados.....60

Figura 37 Seudo-sección SEVs VdG.....61

Figura 38 Perfil de calicata eléctrica #1.....62

Figura 39 Perfil de calicata eléctrica #2.....62

Figura 40 Perfil de calicata eléctrica #3.....63

Figura 41 Perfil de calicata eléctrica #4.....63

Figura 42 Perfil de resistividad 01 y 02 Villas de Guadalupe (VdG).64

Figura 43 Perfil de resistividad 03 VdG.65

Figura 44 Perfil de resistividad 04 VdG.65

Figura 45 Perfil 05 y 06 VdG.....66

Figura 46 Distribución de los estudios MASW 1D en segunda zona.67

Figura 47 MASW 1D 101 y 102 VdG.67

Figura 48 MASW 1D 103 al 110 VdG.68

Figura 49 MASW 1D 111 al 118 VdG.69

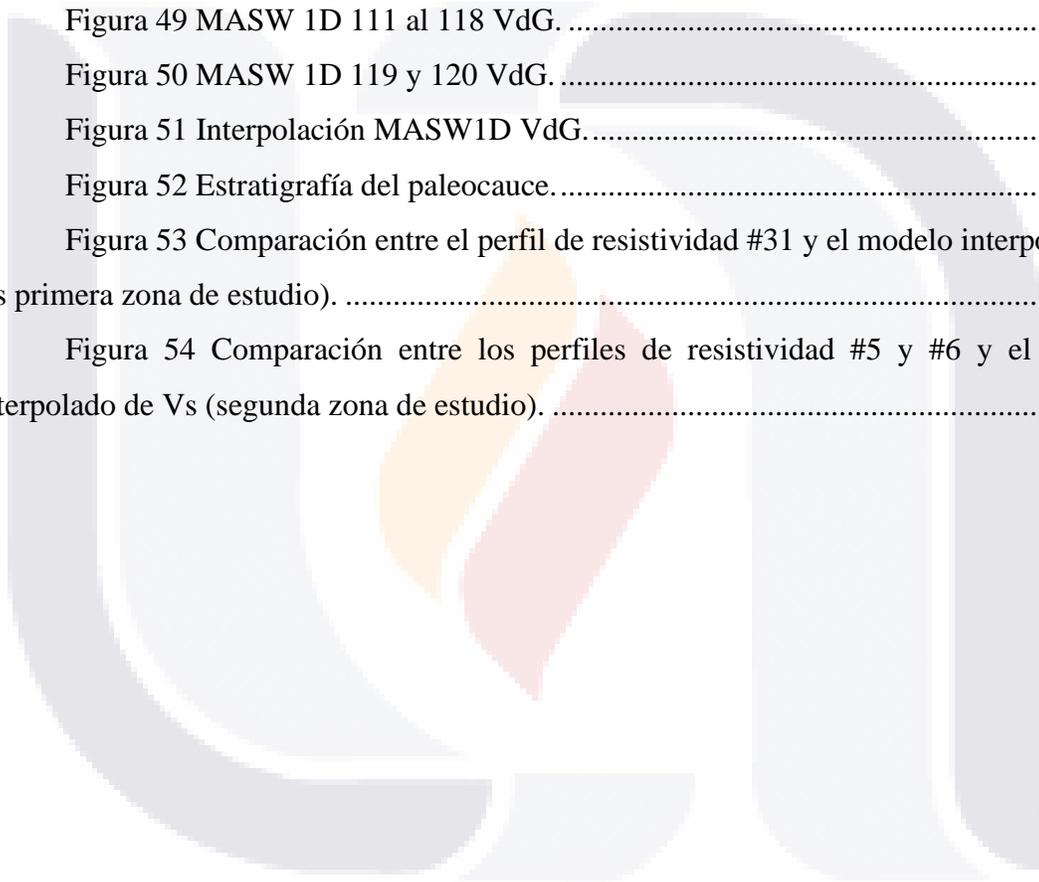
Figura 50 MASW 1D 119 y 120 VdG.70

Figura 51 Interpolación MASW1D VdG.70

Figura 52 Estratigrafía del paleocauce.70

Figura 53 Comparación entre el perfil de resistividad #31 y el modelo interpolado de Vs primera zona de estudio).73

Figura 54 Comparación entre los perfiles de resistividad #5 y #6 y el modelo interpolado de Vs (segunda zona de estudio).74



RESUMEN

Actualmente muchas ciudades experimentan afectaciones debido a un problema geológico-antropogénico-geotécnico llamado subsidencia. Tal es el caso para la ciudad de Aguascalientes, la cual está localizada dentro de un valle aluvial y fluvial que, con el paso del tiempo y debido a la sobreexplotación de aguas subterráneas, ha experimentado hundimientos de la elevación natural del terreno debido al reacomodo de partículas, lo que se ha manifestado por la generación de asentamientos diferenciales y de discontinuidades (fallas y grietas) en la superficie. Estas discontinuidades generan afectaciones a los bienes inmuebles localizados sobre o cerca a la traza de dichas discontinuidades.

Al estudiar dicho fenómeno es posible determinar que el terreno experimenta modificaciones en sus propiedades mecánicas, por lo que surge la interrogante de si dichas modificaciones generan algún cambio en las propiedades dinámicas del subsuelo, y en consecuencia en el peligro sísmico de la zona.

Para responder esta interrogante se propuso un estudio de caracterización de las velocidades de onda de cortante del terreno afectado por fallas y fracturas. Se utilizaron métodos eléctricos y sísmicos para dicha caracterización, específicamente los métodos utilizados fueron: sondeos eléctricos verticales, calicatas eléctricas y tomografías eléctricas resistivas para localizar las zonas de la traza de las discontinuidades, y multi-análisis de ondas superficiales 1D para determinar las velocidades de cortante asociadas a las zonas afectadas por las discontinuidades.

Los métodos eléctricos nos permitieron observar los anchos de afectación que genera cada discontinuidad, esto con el fin de centrar la aplicación de métodos sísmicos a dichas áreas, complementando la caracterización con mediciones adicionales fuera de las trazas o ancho de afectación de las discontinuidades, para contrastar y comparar los valores de V_s de las zonas afectadas con las no afectadas.

Los resultados indican que el valor de V_s muestra un decremento solo en la zona de brecha de la discontinuidad para fallas asociadas a subsidencia; mientras que en fracturamientos debidos a paleocauces, se observa una anomalía de una estructura más compleja debido a la heterogeneidad de los materiales y de la estratigrafía característica de un paleocauce.

ABSTRACT

Currently many cities are affected by a geological-anthropogenic-geotechnical problem called subsidence. Such is the case for the city of Aguascalientes, which is located within an alluvial and fluvial valley that, with the passage of time and due to the overexploitation of groundwater, has experienced subsidence of the natural elevation of the land due to the rearrangement of particles, which has been manifested by the generation of differential settlements and discontinuities (faults and cracks) on the surface. These discontinuities generate effects on real estate located on or near the trace of said discontinuities.

When studying this phenomenon, it is possible to determine that the terrain experiences modifications in its mechanical properties, which is why the question arises as to whether these modifications generate any change in the dynamic properties of the subsoil, and consequently in the seismic danger of the area.

To answer this question, a characterization study of the shear wave velocities of the ground affected by faults and fractures was proposed. Electrical and seismic methods were used for said characterization, specifically the methods used were: vertical electrical soundings, electrical test pits and resistive electrical tomography to locate the areas of the trace of the discontinuities, and multi-analysis of surface waves 1D to determine the velocities of shear associated with the areas affected by the discontinuities.

The electrical methods allowed us to observe the widths of affectation generated by each discontinuity, this in order to focus the application of seismic methods to these areas, complementing the characterization with additional measurements outside the traces or width of affectation of the discontinuities, to contrast and compare the V_s values of the affected areas with the unaffected ones.

The results indicate that the value of V_s shows a decrease only in the gap zone of the discontinuity for faults associated with subsidence; while in fractures due to paleo-channels, an anomaly of a more complex structure is observed due to the heterogeneity of the materials and the characteristic stratigraphy of a paleo-channel.



**CAPÍTULO I:
INTRODUCCIÓN**

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En el estado de Aguascalientes uno de los problemas geotécnicos principales es el de subsidencia.

Este es un fenómeno que afecta al terreno. Se caracteriza por el descenso irregular y paulatino del nivel de la superficie del terreno, que provoca fracturamientos y daños en infraestructura y en el terreno natural. Este fenómeno puede ser ocasionado por diferentes factores, en el caso del valle de Aguascalientes es la sobreexplotación de aguas subterráneas (Herrera, 2012).

La extracción de fluidos (agua, gas o petróleo) desde el terreno puede causar importantes tasas de subsidencia como consecuencia del cierre gradual de los poros ocupados por el fluido extraído (Tomás, et al., 2009).

Por otra parte, el estudio de la propagación de ondas sísmicas en la tierra es un elemento importante que permite tomar medidas que contrarresten los peligros que estas ocasionan. Las ondas sísmicas son atenuadas debido a las heterogeneidades del suelo, las cuales actúan como dispersores. Los principales procesos de atenuación están relacionados con la difusión geométrica (la onda se expande en un área más grande y la amplitud se disminuye), el esparcimiento (la onda interactúa con cuerpos más pequeños de la longitud de onda, con velocidad de onda diferente que el medio circundante y se atenúa) y atenuación intrínseca (el movimiento de onda activa procesos que convierten a onda en otras formas de energía) (Delgado, 2012).

Los estudios de propagación de ondas sísmicas ayudan a definir las zonas de peligro sísmico, y de esta forma poder diseñar de manera adecuada las estructuras que se desean construir.

En la literatura científica no se ha reportado un estudio específico de lo que sucede con las ondas sísmicas en zonas de fallas por subsidencia, si las ondas son afectadas positiva o negativamente o no tienen ninguna afectación y su propagación sigue con la misma magnitud y dirección. Este cuestionamiento se hace ya que la subsidencia, al crear nuevas fallas o reactivar fallas antiguas, cambia la continuidad del suelo, por lo que también podría cambiar la continuidad de las ondas sísmicas, y en caso de hacerlo es necesario saber cuáles son las nuevas características de las ondas para así poder determinar el peligro sísmico que se enfrenta ante estas situaciones.

Para esto es necesario tomar en cuenta la relación que existe entre las variables, propagación de ondas sísmica y fallas por subsidencia, para determinar si existe una variación en alguna de ellas, tomando medidas de la magnitud de ondas antes y después de la falla a estudiar,

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y en caso de que exista una variación explicar por qué sucede esto, así como los factores que influyen.

1.1 Objetivo general

Determinar el efecto de los fracturamientos asociados a subsidencia en la propagación de ondas sísmicas, mediante un estudio teórico-experimental, para efectos de evaluación del peligro sísmico, en zonas de fracturamientos activos.

1.2 Objetivos particulares

- Determinar el ancho de afectación de una fractura provocada por subsidencia.
- Determinar el comportamiento de la propagación de ondas sísmicas a través de fracturamientos en el valle de Aguascalientes.

1.3 Pregunta de investigación

¿Las zonas de falla producidas por subsidencia producen algún efecto en la propagación de ondas sísmicas que modifique el peligro sísmico?

1.4 Alcances

- Se utilizaron métodos eléctricos para hacer una caracterización del terreno afectado por agrietamientos.
- Se estudiaron ondas sísmicas en zonas de fracturamientos generados por subsidencia en el valle de Aguascalientes.
- Las ondas sísmicas fueron producidas por fuentes activas.
- Se utilizaron sensores de movimiento y de aceleración.
- Se aplicó la metodología de CFE (2015) para determinar el efecto de sitio causado por los fracturamientos.

En este estudio se exploró la propagación de las ondas sísmicas en las zonas de falla producidas por el fenómeno de subsidencia.

Durante este estudio también se abordó el tema de la propagación de ondas sísmicas, los factores de atenuación o amplificación, y el peligro sísmico que implica la presencia de las fallas y fracturas activas asociadas a subsidencia.

1.5 Justificación

En cualquier lugar en donde se pretende construir, es muy importante conocer el peligro sísmico que tiene la zona a desarrollar, ya que la ocurrencia de sismos de cierta intensidad, pudieran dañar las construcciones si no fueron diseñadas conforme al nivel de peligro sísmico del sitio en donde se construyeron. García, et al., (2012) dicen que “para tomar en cuenta la incertidumbre en esta ocurrencia y en las sollicitaciones sísmicas de diseño, la evaluación probabilística del peligro sísmico es empleada para desarrollar espectros de peligro uniforme y mapas de contorno de peligro sísmico” (p. 27).

Actualmente se tienen mapas de peligro sísmico que indican el nivel de peligrosidad que se deben tomar en cuenta en el diseño de estructuras que soporten los daños que un sismo podría provocar en ellos.

Por otra parte, el hundimiento de la tierra, provocado por extracción de fluidos, genera discontinuidades en el terreno que afectan a los bienes inmuebles, así como a instalaciones subterráneas (Pacheco-Martínez, et al., 2015). Al generarse discontinuidades, las propiedades mecánicas del terreno se modifican, por lo que es necesario realizar estudios que nos permitan determinar en qué medida se modifica también el comportamiento dinámico del terreno.

No se sabe si las fallas asociadas a la subsidencia afectan la propagación de ondas sísmicas, y en caso de que sí afecten es necesario saber en qué medida lo hacen.

Este estudio aportará elementos para evaluar si hay alguna afectación a la propagación de ondas sísmicas y, por lo tanto, al peligro sísmico en una zona que tenga presencia de fallas provocadas por el proceso de subsidencia.

1.6 Hipótesis

Actualmente existen mapas a nivel nacional que presentan las aceleraciones máximas esperadas en roca por efecto de los sismos originados en las principales zonas sismogénicas. Sin embargo, es frecuente que estas aceleraciones se amplifican por el efecto de sitio, esto se debe a que sobre la roca se presentan rellenos granulares, los cuales son más blandos y modifican la

propagación de las ondas sísmicas. Dentro de los mismos rellenos existen heterogeneidades en las propiedades mecánicas causadas por variaciones estratigráficas o discontinuidades, por lo que las fallas y fracturas asociadas a subsidencia pudieran ser un factor para modificar el efecto de sitio.

Para la elaboración de este estudio se toma como variable independiente a las propiedades mecánicas de terreno, que a pesar de que no se pueden manipular como parte del experimento, se pueden determinar in situ. Estas variables afectan a la propagación de onda, causando una atenuación o amplificación de las aceleraciones del terreno, y por lo tanto modifica el peligro sísmico del terreno de un punto a otro.

La hipótesis de este trabajo es que la alteración del terreno, provocada en zonas de fallas y fracturas asociadas a subsidencia, modifica el efecto de sitio y, por consiguiente, el peligro sísmico.

1.7 Metodología

Se realizó un estudio de tipo experimental que incluyó la caracterización mecánica-dinámica del terreno en zonas donde existen fracturamientos generados por subsidencia, observando hasta dónde se conservan las propiedades del terreno no afectado, para posteriormente evaluar el efecto de sitio asociado a la zona perturbada por el fracturamiento.

Para realizar la caracterización del terreno se usó equipo de exploración sísmica y de resistividad eléctrica; para la recolección de datos se utilizaron técnicas geofísicas y de geotecnia, también se usaron bitácoras mediante archivos de lecturas sísmicas y de resistividad utilizando software especializados para su análisis.

Para la elaboración de los estudios de resistividad eléctrica se utilizó un resistivímetro marca Syscal Junior con capacidad para 24 electrodos y un equipo SuperSting con una capacidad de mayor número de electrodos. El procesamiento de los datos obtenidos se realizó mediante los programas Prosys II, Res2dinv, ZondRes2D y Surfer, para poder crear gráficos que nos permitan visualizar los modelos de resistividad del terreno, con los cuales se hizo un preanálisis del ancho de afectación que causa la fractura en el terreno.

Por otra parte, para los estudios de sísmica se usó un sismómetro marca Geometrics con capacidad para 24 geófonos. Los geófonos empleados fueron de 4.5 Hz. Se emplearon además los programas Pickwin, Plotrefa, y Seisimager sw para hacer el procesamiento de datos y elaborar los modelos de velocidad de propagación de onda sísmica. Se utilizaron los métodos de refracción y

Multi-Análisis de Ondas Superficiales (por sus siglas en inglés MASW), para este último se usó la variante de 1D.

1.7.1 Resistividad eléctrica del terreno

Para medir la resistividad eléctrica del terreno se utiliza el siguiente material (Figura 1 y Figura 2):

- Resistivímetro Syscal Junior
- Resistivímetro SuperSting
- Cable
- Electrodo
- Caimanes
- Marro
- Batería eléctrica de 12 volts
- Odómetro con rueda (perrito)
- Cinta métrica
- Agua



Figura 1 Equipo para mediciones de resistividad eléctrica.

Se aplicaron 3 diferentes técnicas de levantamiento de datos de resistividad eléctrica: sondeo eléctrico vertical (SEV), calicata eléctrica y tomografía eléctrica resistiva (TER).

Para la elaboración de los SEVs se utilizó un arreglo tipo Schlumberger, con la separación de electrodos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1 Separación de electrodos para SEV.

AB/2	MN/2
2	1

4	1
10	1
10	5
20	5
30	5
50	5
50	10
70	10
100	10

Para su procesamiento se introdujeron los datos obtenidos en una hoja de cálculo, para corregir y eliminar el error causado debido a los encloches realizados en campo.

Por otra parte, las calicatas se realizaron con una separación de electrodos de 20 metros, cada una con longitud diferente entre ellas, ya que esta longitud dependió de la accesibilidad del sitio. Se ocupó un arreglo eléctrico Wenner debido a las facilidades de su implementación para la técnica de calicatas.



a)

b)

Figura 2 a) cables para SEV y calicatas. b) cables para TER.

Por último, para los TERs se utilizó un arreglo Dipolo-Dipolo con 5 separaciones diferentes entre los electrodos, las cuales fueron de 0.85, 2.5, 4, 5 y 10 metros. Algunas de las mediciones se realizaron con la función Run Roll along, la cual permite ampliar la longitud de la medición, pero conservando la profundidad máxima que se consigue con la separación de los electrodos empleada, esta profundidad va de 1/5 a 1/4 de la longitud que existe entre los primeros 24 electrodos. Estas características, además de la ubicación de los estudios, se muestra en el capítulo de resultados.

1.7.2 Estudios sísmicos del terreno.

Para llevar a cabo estas mediciones fue necesario contar con el siguiente equipo (Figura 3):

- Sismómetro marca Geometrics
- Geófonos de 4.5 Hz
- Laptop
- Cables
- Marro
- Placa de acero
- Fuente de energía



Figura 3 Equipo para mediciones sísmicas.

La técnica utilizada para la adquisición de datos fue la de MASW 1D. En esta técnica se utilizaron separaciones de geófonos desde 1.5 metros hasta 2.5 metros, además de una distancia a la generación de onda de 2 veces la apertura de geófonos. Estas características, además de la ubicación de los estudios, se muestra en el capítulo de resultados.



**CAPÍTULO II:
ESTADO ACTUAL DEL
CONOCIMIENTO**

CAPÍTULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

Cormier & Spudich (1984) estudiaron la amplificación del movimiento del suelo y la complejidad de la forma de onda en zonas de falla tomando como ejemplos las fallas de San Andreas y Calaveras.

Este estudio lo realizaron con la teoría de los rayos asintóticos (por sus siglas en inglés ART). Investigaron los efectos en las ondas de cuerpo que causa la variación lateral de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas, de la zona que rodea una falla de terremoto.

También demostraron, mediante cálculos sintéticos y ejemplos de datos observados, que una zona en forma de cuña de baja velocidad que rodea a una falla, puede explicar la complejidad y amplificación de las ondas P de los eventos de foco poco profundos observados en la zona de falla. Sus resultados mostraron que estos fenómenos de amplificación y de cambio a un comportamiento más complejo son dependientes de la frecuencia.

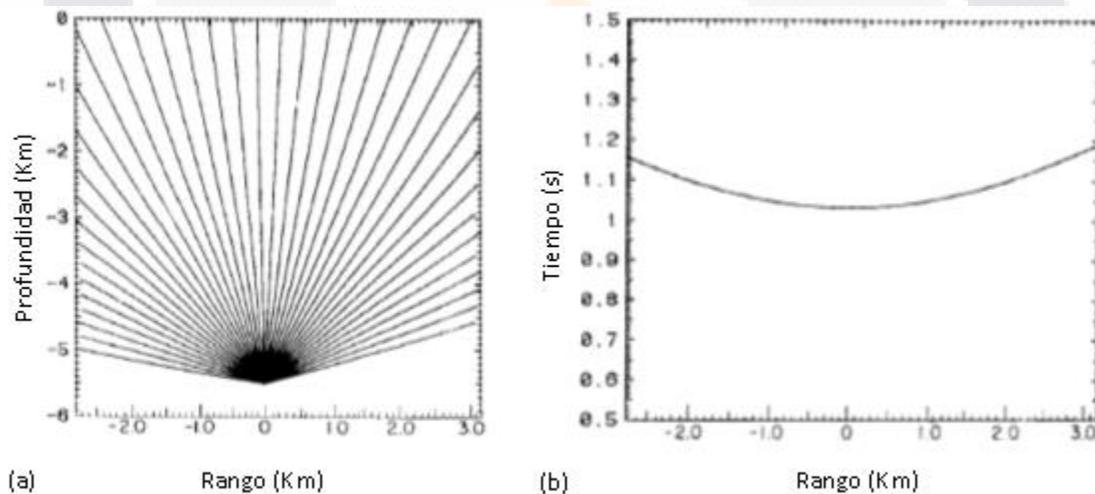


Figura 4 (a) Trazo de las ondas p en un modelo lateralmente homogéneo. (b) Los tiempos de viaje de ondas P desde una profundidad de 5.5 km. Tomado y modificado de Cormier & Spudich (1984).

Los cálculos muestran que los desplazamientos verticales de 10-20 Hz de los terremotos ubicados a una profundidad de 3-10 km, se amplifican en un orden de magnitud en una región de 1-2 km de ancho centrada en la traza de fallas, en comparación con los desplazamientos pronosticados por modelos de la corteza lateralmente homogéneos (Figura 4 y Figura 5).

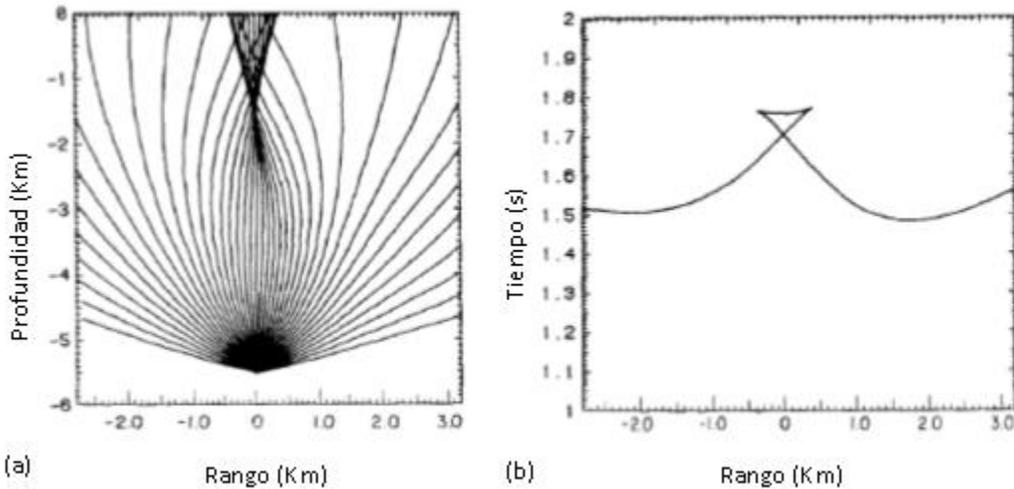


Figura 5 (a) Trazo de las ondas P en el modelo de zona de falla. (b) Los tiempos de viaje de ondas P desde una profundidad de 5.5 km en el modelo de zona de falla. Ambas para la falla de San Andrés. Tomado y modificado de Cormier & Spudich (1984).

Dependiendo de la profundidad de la fuente del terremoto, la estructura y el contraste de la velocidad de la zona en forma de cuña, se producirán múltiples triplicaciones en la curva de tiempo de viaje de las ondas P y S directas en las estaciones en la zona de falla.

Por otra parte, Igel, Ben-Zion & Leary (1997) realizaron una simulación de la propagación de ondas V de SH y P-S en zonas de falla, sus observaciones sugieren que la zona de falla sísmica (por sus siglas en inglés FZ) se caracteriza por una franja de atenuación, de alta a baja velocidad localizada en el centro de su traza, con un ancho de decenas a cientos de metros, con contrastes de velocidad de hasta 50%.

En el estudio presentan los resultados de la propagación de ondas SH y P-SV a través de varias estructuras de FZ. El objetivo principal del estudio fue el de simular las ondas sísmicas de la FZ generadas por una fuente puntual en una estructura heterogénea 3D. Para obtener resultados 3D realistas, se utilizó un algoritmo numérico basado en una aproximación de diferencias finitas (por sus siglas en inglés FD) de la ecuación de onda elástica en coordenadas cilíndricas.

Los autores reportaron que cuanto más largo es el camino de propagación, más ciclos se desarrollan como resultado de la interferencia constructiva dentro de la FZ. También para una FZ planar, las características de las formas de onda registradas en la superficie, dependen en gran medida de la longitud de la trayectoria de propagación de la onda dentro de la capa de baja velocidad y del ancho de la FZ.

Las simulaciones muestran que las ondas P atrapadas irradian energía S fuerte hacia la roca huésped adyacente.

En otro estudio acerca de las ondas amplificadas por efecto de la presencia de una zona de falla, como un posible peligro sísmico a lo largo de la falla de Calaveras, en el centro de California, Spudich & Olsen (2001) llevaron a cabo una simulación de movimientos en el suelo en un modelo simplificado de la región del Lago Coyote utilizando un método 3D de diferencias finitas de cuarto orden para poder verificar los efectos esperados teóricamente

Los resultados sugieren que las ondas guiadas en la zona de falla (por sus siglas en inglés FZGW), las cuales se generaron mediante explosivos y micro terremotos, deben considerarse como un peligro sísmico reconocido en la banda de 2-5 Hz en una zona de 40-400 m de ancho alrededor de las fallas.

Sus resultados mostraron una amplificación de la onda sísmica causada por la presencia de una zona de baja velocidad (por sus siglas en inglés LVZ) en la falla de Calaveras (Figura 6). También encontraron que los movimientos amplificados más intensos ocurrieron en una zona más amplia, extendiéndose hasta 1.2 km desde la traza de la superficie mapeada de la falla. Además, a diferencia de los estudios anteriores sobre la influencia de FZGW, esta investigación utilizó datos generados por un terremoto que excitó a la LVZ en la banda de frecuencia de 0.6-1.0 Hz.

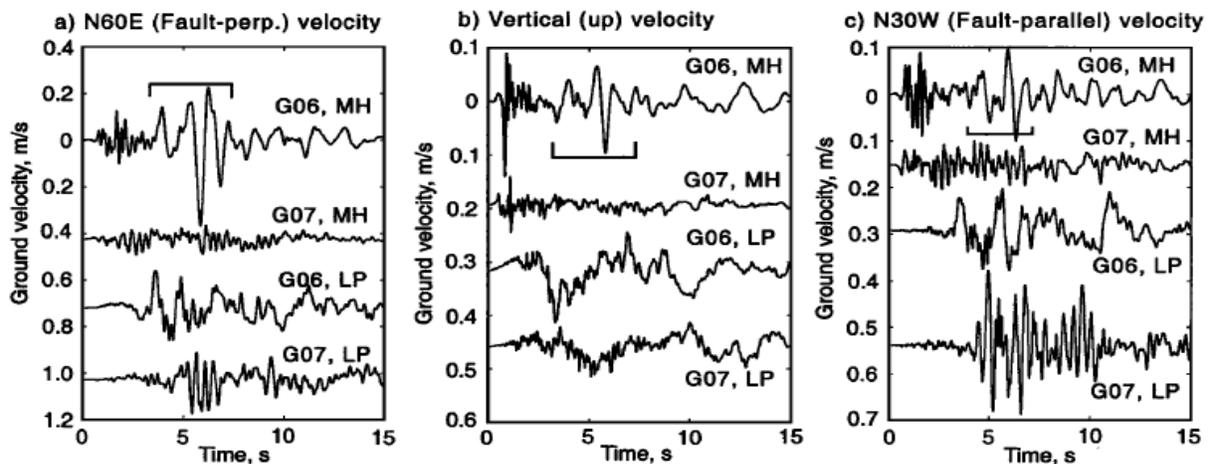


Figura 6 Comparación entre las velocidades del terreno registradas en las estaciones G06 y G07 de los terremotos de Morgan Hill (MH) y Loma Prieta (LP). Indicando con un corchete la probable amplificación de onda S en G06 no vista en G07 en el terremoto MH. Tomado de Spudich & Olsen (2001).

Como resultado de la investigación se concluyó que las FZGW pueden amplificar movimientos del terreno en las frecuencias de 2 a 5 Hz, dentro de una franja de 200 m medida desde de la traza de la falla, por lo que dichas franjas deben considerarse con un riesgo sísmico mayor que se debe de mapear. Además, el trabajo muestra que la amplificación de las ondas S

directas inducida por la LVZ puede elevar el peligro dentro de una franja de 1 km de algunas fallas. Esto sugiere que debería definirse algún tipo de franja especial alrededor de las fallas activas, en las que se esperarían amplificaciones de los efectos sísmicos.

Zhang & Gao (2009) realizaron un modelado de ondas elásticas en medios fracturados 3D: con un enfoque explícito.

Su estudio indica que las fracturas influyen fuertemente en la propagación de las ondas sísmicas, produciéndose una dispersión y una anisotropía en las ondas que se propagan a través de dichas zonas de fracturas. Para obtener características sísmicas detalladas, las fracturas deben modelarse como inclusiones locales mediante simulación numérica 3D.

De_Basabe, Sen, & Wheeler (2011) estudiaron la propagación de ondas sísmicas en medios fracturados: con un enfoque de Galerkin discontinuo

El objetivo del trabajo fue simular numéricamente la propagación de las ondas elásticas en medios fracturados, tomando ventaja de que la simulación numérica requiere menos suposiciones que los modelos analíticos.

El Método Galerkin Discontinuo (por sus siglas en inglés DGM) es una generalización del método de elementos finitos que permite que las funciones de aproximación sean discontinuas en las interfaces del elemento. Este método es particularmente adecuado para incorporar fracturas o fallas porque se simulan como discontinuidades en el campo de desplazamiento.

Los resultados de este estudio muestran que la discontinuidad introduce un cambio de fase y que los coeficientes de reflexión y transmisión dependen de la frecuencia ver Figura 7 y Figura 8.

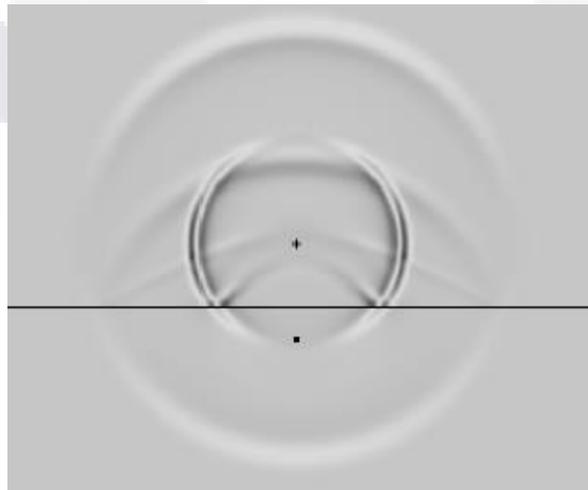


Figura 7 Interacción de las ondas elásticas con la fractura. La línea sólida negra, la estrella y el cuadrado indican la ubicación de la fractura, la fuente y el receptor, respectivamente. Tomada de De_Basabe, Sen, & Wheeler (2011).

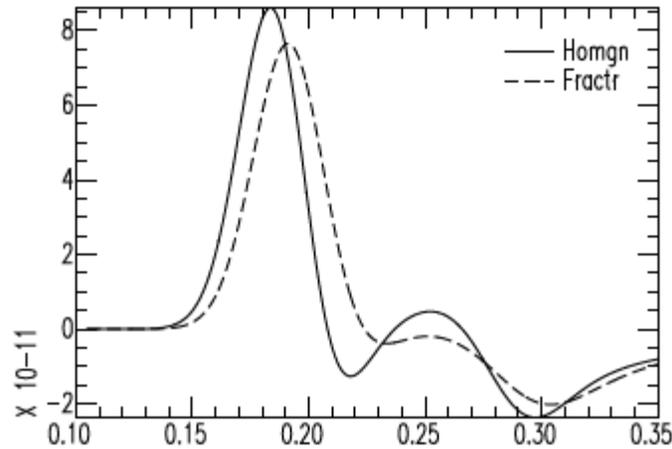


Figura 8 Sismograma para la función fuente. La línea sólida negra corresponde al caso homogéneo (sin falla) y la línea de puntos al modelo de falla. Tomada de De_Basabe, Sen, & Wheeler (2011).

El método propuesto no está restringido a modelos simplificados, se puede aplicar a modelos 3D y geometrías arbitrarias.

Chung, et al., (2016) estudiaron un método generalizado de elementos finitos multiescala para la propagación de ondas elásticas en medios fracturados.

En su estudio explican que en los procesamientos de datos sísmicos se puede obtener información de la estratigrafía, incluyendo la presencia de las fracturas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que para fracturas menores a 10 metros no se alcanza el límite de la resolución sísmica, lo que provoca que no sea posible poder identificarlas utilizando los métodos usuales, por lo que es necesario hacer un mejor análisis de datos. También explican que en los modelos suponen que las fallas son paralelas y verticales, lo cual en la realidad no es así, ya que las fallas tienen geometrías y distribuciones más complicadas. Para abordar este problema se puede emplear el método denominado modelo de red de fractura discreta (por sus siglas en inglés DFN) con el cual se pueden simular distribuciones espaciales de fracturas y fallas muy complejas.

El trabajo muestra simulaciones numéricas en cuadrículas de elementos finitos gruesas para obtener resultados rápidos, mientras que para incluir la influencia de la heterogeneidad de las zonas de fracturas se usan elementos finitos más finos.

La idea principal fue capturar la influencia de las fracturas pequeñas y otras heterogeneidades con una retícula de elementos finitos fina, y luego usar estos resultados para simular la propagación de la onda rápidamente en una retícula de elementos finitos más gruesa

Los estudios de Cormier & Spudich (1984); Igel et al., (1997); Spudich & Olsen (2001) indican que cerca de una falla se pueden encontrar zonas de baja velocidad, las cuales generan

amplitudes en los desplazamientos del terreno, por lo que es necesario considerar la variación que existe, para poder hacer un cálculo más específico que nos permita tomar en cuenta el nuevo peligro sísmico. Por otra parte debido a que las fracturas existentes generan variaciones en la propagación de onda (Zhang & Gao, 2009; De_Basabe et al., 2011), es necesario tomar en cuenta lo que estas fracturas provocan en el sitio.





**CAPÍTULO III:
MARCO TEÓRICO**

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Subsistencia

Según la Real Academia Española la subsistencia es: “Hundimiento progresivo de la superficie del terreno como consecuencia de trabajos de minería, colapso de cavidades subterráneas, extracción de agua o de petróleo, o desecación”.

La subsistencia es un proceso de hundimiento gradual o repentino del suelo, el cual se caracteriza por tener una deformación casi vertical del terreno (Keller & Blodgett, 2004) (ver Figura 9). En las zonas en donde la subsistencia se presenta de manera diferencial, se pueden reactivar fallas geológicas y/o generar grietas o fracturas que pueden ocasionar daños a las propiedades y a la infraestructura que se encuentre sobre o cerca de ellas, provocando considerables costos en la reparación o incluso en algunos inmuebles la pérdida total de ellos.

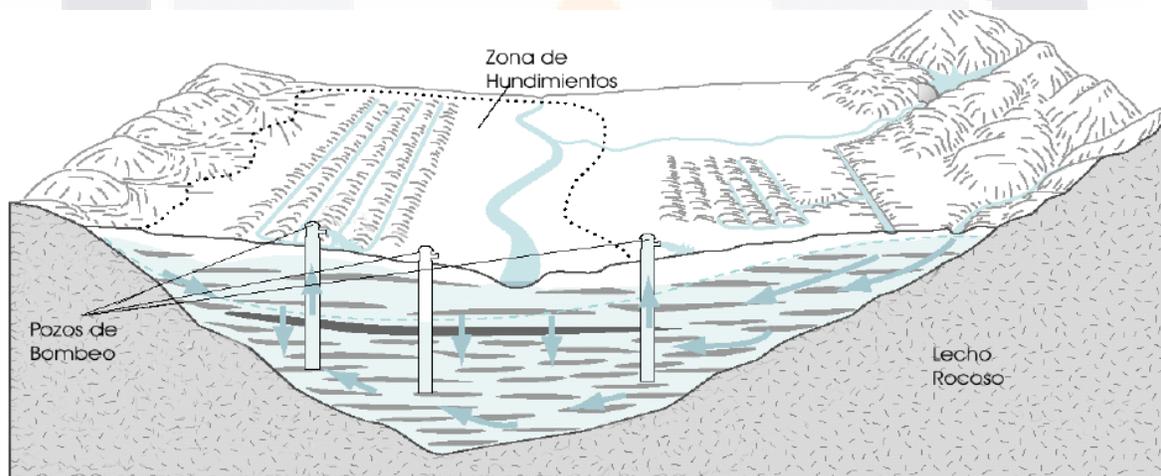


Figura 9 Efecto de subsistencia en el terreno. Tomado y modificado de Galloway, Jones, & Ingebritsen (1999)

Según diversos autores (Vallejo, et al., 2002; Keller & Blodgett, 2004; Tomás et al, 2009) existen varias razones por las que sucede este proceso, algunas de ellas son por causas naturales, actividades humanas o por la combinación de ambas.

Causas que pueden generar subsistencia.

- Naturales
 - Karst: este es un proceso de disolución de rocas, el cual tiene lugar cuando el agua superficial infiltrada o el agua subterránea, pasa a través de rocas que son muy fáciles de diluir, generando así huecos en el subsuelo.

- Termokarst: este fenómeno es el descongelamiento y fundición de terreno congelado, el cual puede estar bajo la superficie, provocando hundimientos que pueden llegar a ser de varios metros.
- Compactación del suelo: esto ocurre cuando los sedimentos son compactados, o en suelos orgánicos el agua es drenada, provocando una disminución del volumen y reducción del nivel superficial.
- Suelos expansivos: estos suelos presentan una variedad de agrietamientos debido a que pueden modificar su volumen, dependiendo de la cantidad de humedad que contengan.
- Inducidas por el hombre
 - Extracción de fluidos: la extracción de fluidos como agua, gas, petróleo, entre otros provoca que la superficie tenga un descenso, ya que todos ellos aportan una elevada presión que permite que se sostenga el suelo subyacente.
 - Minería subterránea: cuando una mina se deja de explotar queda solo los túneles y los pilares que, como no se les da un mantenimiento, estos últimos fallan provocando un colapso del techo de la mina y por consiguiente del terreno que se encuentra sobre él.

En México el fenómeno de subsidencia se da en lugares que cuentan con acuíferos formados por materiales no consolidados como aluviales y lacustres (Zermeño-De-Leon, et al., 2006). En Aguascalientes se han presentado problemas de subsidencia relacionados con la sobreexplotación del acuífero el cual está compuesto de materiales granulares no consolidados; como consecuencia de la extracción de agua se reduce el volumen de los estratos de material granular, manifestándose en un desplazamiento vertical en la superficie.

También la geología estructural del valle de Aguascalientes juega un papel importante en la reactivación y generación de grietas y fracturas. El valle se localiza sobre un graben de origen tectónico formado por dos fallas normales con dirección N-S, relleno de materiales granulares y sedimentos no consolidados, que yacen sobre un lecho rocoso irregular, el cual condiciona la forma en que el material se acomoda en su proceso de consolidación por efecto de la extracción de agua (Pacheco-Martínez, et al., 2011), por lo que la mayoría de las fracturas y fallas del terreno

generadas o reactivadas por la subsidencia, están casi paralelas entre ellas y tienen la orientación de las fallas tectónicas que delimitan al valle de Aguascalientes.

Se tienen registros en los que se muestra que en 1981 se comenzaron a presentar reportes de la aparición de grietas en la superficie del terreno en la zona urbana de Aguascalientes, siendo para 1984 un problema más agudo (Aranda-Gómez, 1989).

Con los fracturamientos asociados a la subsidencia se genera una diversidad de problemas que afectan a la sociedad, los principales de ellos son: contaminación del acuífero, daños a bienes inmuebles y vialidades, y daños a infraestructuras subterráneas. Además, algunas de las estructuras afectadas son consideradas edificios históricos.

3.1.1 Fracturamientos de terreno

Los fracturamientos del terreno ocurren debido a la generación de esfuerzos de tensión y de cortante en subsuelo causados por la subsidencia diferencial, la cual a su vez es resultado de la diferencia de la profundidad al lecho rocoso. Las fracturas generadas exclusivamente con esfuerzos tensionales se originan en la superficie o en la parte más somera del terreno, y posteriormente migran hacia abajo (Hernández-Marín & Pacheco-Martínez, 2011).

Los fracturamientos en el terreno pueden variar, dependiendo de cómo esté conformada la capa de roca que se encuentra por debajo de los sedimentos depositados, es decir, la profundidad y forma de esta capa determina el tipo de fractura que se genera en la superficie.



Figura 10 Configuración de basamento y tipos de fracturas. Tomado y modificado de Pacheco-Martínez, et al. (2011).

En la Figura 10 se muestra los tipos de fractura que se pueden generar dependiendo de la configuración del basamento, además también se presenta el caso de los fracturamientos asociados a la reactivación de paleocauces (escenario 3 en la figura).

La configuración del basamento para que se generen fallas y fracturas son el 1, 2 y 4 en la Figura 10. En el punto 1 se observa el agrietamiento debido a la configuración de pendiente, en el

2 se presentan debido a una protuberancia basal, y en el 4 se muestran las fracturas generadas por la presencia de una falla normal.

Por último, se presenta el número 3 el cual corresponde a la existencia de un paleocanal, el cual no depende de la configuración que se tenga en el piso roco. Este se genera debido al arrastre de materiales finos bajo la superficie, generando oquedades y posteriormente el colapso del techo de la oquedad (Pacheco-Martínez, et al., 2011).

Las fallas y fracturamientos asociados a subsidencia tiene un ancho de afectación diferente, ya que las medidas y/o pendientes que se tengan en el basamento son los que determinan el área afectada en la superficie. También en el caso de los paleocanales, la magnitud y extensión de la afectación tiene una variación dependiendo el ancho y largo que el antiguo cauce haya tenido.

3.2 Ondas sísmicas

Los placas tectónicas en que está dividida la tierra están en un constante movimiento relativo, chocando entre ellas o desplazándose una respecto a otra; pero en ocasiones quedan incrustadas o trabadas por efecto de la fricción provocando que se genere una acumulación de energía elástica de deformación, la cual al sobrepasar la resistencia de los materiales de los bordes de las placas, genera una ruptura liberando energía elástica en forma de ondas sísmicas (Giner Caturla & Molina Palacios, 2001).

Las ondas sísmicas transmiten la energía elástica que se libera en el momento de la ruptura. Las ondas se pueden dividir en dos tipos: ondas internas o de cuerpo y ondas superficiales (Figura 11).

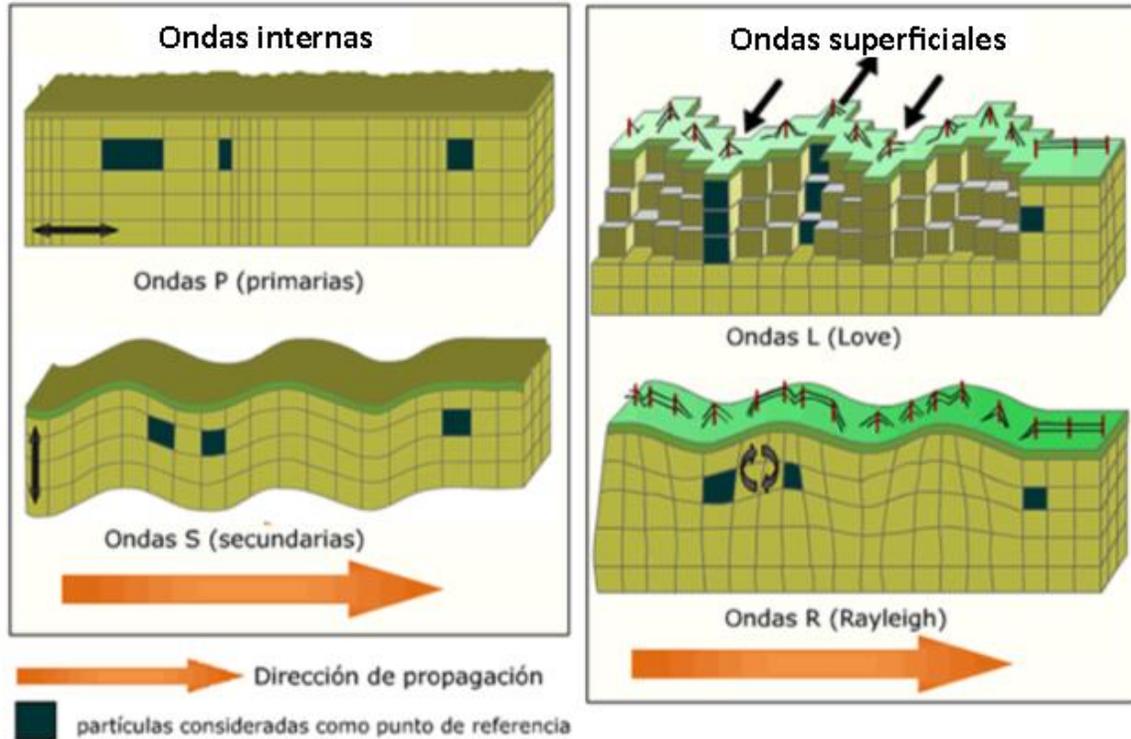


Figura 11 Tipos de ondas sísmicas.

http://www.cienciasfera.com/materiales/biologiageologia/cienciatierra/tema11/21_ondas_ssmicas.html.

3.2.1 Propagación de ondas sísmicas

Las ondas internas se propagan a través de las zonas profundas de la tierra y se dividen en ondas primarias (ondas P) y ondas secundarias (ondas S), llamadas así por tener esa posición de llegada a una estación dada. Las ondas P son ondas longitudinales que generan una deformación en dirección a la misma de las ondas y se pueden propagar tanto en medios sólidos como en líquidos. Por otro lado, las ondas S son transversales, las cuales generan deformaciones en dirección perpendicular a la de la onda, pero estas no se pueden propagar en medios líquidos. (Herráiz Sarachaga, 1997; Giner Caturla & Molina Palacios, 2001). Por otra parte, las ondas de superficie se presentan cuando el medio tiene una superficie libre y se dividen en ondas Love y ondas Rayleigh. Este tipo de ondas son más destructivas que las ondas internas, ya que cuentan con periodos y amplitudes mayores.

3.2.2 Velocidad de propagación de ondas sísmicas.

La velocidad a la que se propagan las ondas sísmicas varía, dependiendo de las propiedades que tenga el medio en donde se transmiten.

Suponiendo las características de medio como isotrópico y homogéneo se obtienen las siguientes ecuaciones, las cuales nos permiten obtener las velocidades de las ondas P y S respectivamente (Udías, 2000; Herráiz Sarachaga, 1997):

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (1)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Donde:

λ y μ = Constantes elásticas de lamé.

λ = constante de lamé a la incompresibilidad.

μ = Módulo de rigidez al cortante o módulo de cizalla.

K = Módulo de incompresibilidad.

ρ = Densidad del medio.

3.3 Leyes de atenuación

Las leyes de atenuación son funciones en las que se relaciona la intensidad sísmica, distancia focal y la fuente-trayectoria-sitio, mediante la elaboración de ecuaciones semiempíricas de atenuación, las cuales nos sirven para evaluar y predecir la peligrosidad sísmica de un sitio de interés (Alva Hurtado & Escalaya, 2005; Chávez, et al., 2012)

Cuando una onda sísmica se aleja de su fuente se generan dos fenómenos físicos: la expansión geométrica y la atenuación física. El primero fenómeno sucede debido a que conforme se aleja, la superficie de frente de onda va creciendo, por lo que la energía se va distribuyendo en esta nueva área. El segundo consiste en que, los materiales por donde se traslada la onda sísmica, absorben parte de su energía (Gómez Capera & Salcedo Hurtado, 2002).

Existe una gran variedad de leyes de atenuación, ya que estas se elaboran para lugares en específico, tomando como referencia datos obtenidos de los registros de sismicidad que se tiene del sitio y posteriormente realizando una curva de ajuste a estos datos. Generalmente estas ecuaciones reflejan las características geotectónicas de la región que se esté estudiando, por lo que sería algo incorrecto importar leyes de atenuación de otras regiones para hacer estudios de

peligrosidad sísmica. También otra característica que se debe de tomar en cuenta, es saber cuál es el mecanismo de falla que origina el sismo.

Para el análisis de la atenuación de ondas, en México, se utilizan 3 leyes que dependen de la trayectoria en el camino de las ondas, así como de la frecuencia en la que se encuentran, teniendo varios parámetros para cada periodo de vibración.

Para terremotos costeros interplaca la ley de atenuación utilizada es la presentada por Ordaz, Jara, & Singh (1989) para la aceleración máxima del terreno provocada por temblores en la costa sur del Pacífico. La cual fue construida a partir de los registros de la Red Acelerográfica de Guerrero.

$$E(\log a_{max}|M_W, R_0) = (1.76 + 0.3M_W - \log R_0 - 0.0031R_0) \quad (3)$$

$$\sigma(\log a_{max}|M_W, R_0) = 0.25 \quad (4)$$

Donde:

$E(\cdot)$ y $\sigma(\cdot)$ = Valor esperado y desviación estándar, respectivamente.

a_{max} = aceleración máxima del terreno en cm/seg^2 .

M_W = magnitud de momento.

R_0 = distancia mínima a la zona de ruptura o distancia mínima a la falla en km.

Por otra parte, para terremotos de profundidad intermedia García, et al. (2005) propusieron un modelo empírico, generado utilizando los registros de temblores de este tipo en México, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\log[a_{max}(M_W, R)] = 0.2 + 0.59M_W - 0.0039R - \log R + 0.008H \quad (5)$$

$$\sigma = 0.28$$

Donde:

a_{max} = aceleración máxima del terreno en cm/seg^2 .

M_W = magnitud de momento.

R = medida de la distancia aproximadamente igual a la distancia promedio hasta la superficie de la falla en km.

H = profundidad focal en km.

σ = desviación estándar de residuos (variabilidad aleatoria).

Para determinar R se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$R = \sqrt{R_{cld}^2 + \Delta^2} \quad (6)$$

$$\Delta = 0.00750 * 10^{0.507M_W} \quad (7)$$

Donde:

R_{cld} = distancia más cercana a la superficie de la falla para los eventos más grandes ($M_W > 6.5$), o distancia hipocentral para el resto, ambas en km.

Δ = término de saturación de fuente cercana definido analíticamente por Atkinson y Boore (2003) de consideraciones geométricas básicas.

Para terremotos superficiales se utiliza la ley de atenuación propuesta por Abrahamson & Silva (1997) la cual fue construida con datos de California, esta ley se utiliza para la modelación de los temblores que ocurren en el eje Neovolcánico y también para los que se presentan en la parte noroeste del país. Dentro de los parámetros que se muestran en este artículo para México solo se utilizan los siguientes parámetros: suelo firme, fallas de rumbo, y sin considerar el efecto de “hanging wall”.

$$\ln Y = f_1(M_W, r_{rup}) + f_2(M_W)F + f_3(M_W, r_{rup})HW + f_4(S, A_{Roca}) \quad (8)$$

Donde:

Y = aceleración máxima del terreno en fracción de g ($g=980.6550 \text{ cm/seg}^2$)

$f_1(M_W, r_{rup})$ = forma funcional básica de la atenuación para eventos de falla de rumbo registrados en sitio en roca.

$f_2(M_W)$ = forma funcional del factor de estilo de falla con dependencia de la magnitud.

$f_3(M_W, r_{rup})$ = forma funcional para el efecto de bloque de techo (hanging wall) con dependencia de la magnitud y de la distancia.

$f_4(S, A_{Roca})$ = forma funcional que proporciona la respuesta no lineal del suelo.

M_W = magnitud del momento.

r_{rup} = distancia más cercana al plano de ruptura en km.

F = variable indicadora para el tipo de falla (1.0 para falla inversa, 0.5 para falla inversa-oblicua, 0 para falla normal y 0 para falla de rumbo).

HW = variable indicadora para un sitio localizado sobre el bloque de techo del plano de ruptura (1 para sitios sobre el bloque de techo, 0 para otros casos).

S = variable indicadora para la clase de sitio (0 para roca o suelo somero, 1 para suelo profundo).

A_{Roca} = aceleración máxima esperada en roca en fracción de g (predicha por la ley de atenuación con $S = 0$).

Algunas otras leyes de atenuación que se han usado en estudios de peligrosidad sísmica en diversas partes del mundo son las mostradas en la Tabla 2

Tabla 2 Ecuaciones de leyes de atenuación. Tomada de Moncayo Theurer, et al., (2017)

Ley de Atenuación	Ecuación
Donovan 1 (D1)	$ah = 1320e^{0.580M(R + 25) - 1.520}$
Donovan 2 (D2)	$ah = 1080e^{0.500M(R + 25) - 1.320}$
Donovan 3 (D3)	$\ln(ah) = 6.98 + 0.50M - 1.25\ln(R + 25)$
McGuire (MG)	$ah = 472.3e^{0.640M(R + 25) - 1.301}$
Gómez, Ordaz y Tena (GOT1)	$\ln(ah) = 2.308 + 0.780M - 0.844 \ln(R) - 0.004(R)$
Gómez, Ordaz y Tena (GOT2)	$\ln(ah) = 1.237 + 1.519M - 0.0313M^2 - 0.844 \ln(R) - 0.004(R)$
Ordaz, Jara y Singh (O.J.S.)	$\log_{10}(ah) = 1.760 + 0.30M - \log_{10}(R) - 0.00310(R)$
Singh (Si)	$\log_{10}(ah) = -0.148 + 0.623M - \log_{10}(R) - 0.00320(R)$
Grases 1 (G1)	$\ln(ah) = 3.75 + 0.470M - 0.570(\ln(R + 10) - 0.670)$
Grases 2 (G2)	$\ln(ah) = 3.75 + 0.470M - 0.570(\ln(R + 10) + 0.670)$
Aguiar 1 (Ag.1)	$\ln(ah) = 6.35 + 0.99M - 1.76 * \ln(R + 40) - 0.6$
Aguiar 2 (Ag.2)	$\ln(ah) = 6.35 + 0.99M - 1.76 * \ln(R + 40) + 0.6$
Sarangoni (Sa)	$\ln(ah) = 8.54 + 0.570M - 1.73\ln(R + 60)$

Donde:

ah (cm/seg² o gals) = aceleración máxima en el punto de estudio para un sismo de magnitud ***M*** y distancia ***R***.

M = Magnitud Richter $M\omega$ del sismo.

R (Km) = Distancia entre el punto de estudio al punto del epicentro del sismo.

3.4 Peligro sísmico

El peligro sísmico se define como la posibilidad de que un valor de cierto parámetro, (desplazamiento, velocidad, aceleración, magnitud u otro) correspondiente al movimiento del suelo, sea excedido en cierto lugar y con un periodo de tiempo definido (García et al., 2012; Giner Caturla & Molina Palacios, 2001; Vallejo et al., 2002; Herráiz Sarachaga, 1997).

La evaluación de peligrosidad nos permite elaborar mapas de peligro sísmico, lo cual nos ayuda a determinar el máximo terremoto que puede afectar a la instalación durante su vida útil, de tal forma que nos permita hacer una planificación urbanista con el diseño estructural adecuado.

Existen diferentes métodos de evaluación de peligrosidad sísmica (Vallejo et al., 2002; Herráiz Sarachaga, 1997; Muñoz, 1989):

- Método determinista: en este método se supone que la sismicidad futura será igual a la pasada, por lo que se toma como valor máximo predecible al mayor valor del que se tenga registro. Para utilizar este método es necesario desarrollar 5 fases las cuales son: caracterización de las zonas sismogénicas, selección del terremoto de control, traslación del terremoto de control, determinación del movimiento del terreno en el emplazamiento y determinación de la peligrosidad sísmica en el emplazamiento.
- Método probabilista: este método se basa en que, al conocer la sismicidad pasada, se pueden obtener leyes de recurrencia, las cuales regirán la sismicidad futura. De esta forma es posible obtener la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de movimiento para un área determinada. Los pasos a desarrollar son: definición de las fuentes sismogénicas, actividad de las fuentes, efecto de los terremotos en el emplazamiento y estimación de la peligrosidad.

Actualmente los métodos más utilizados son los probabilistas, aunque cabe mencionar que ninguno de los dos métodos proporciona resultados del todo satisfactorios, ya que se desconocen

partes de los modelos en que se basan y además los datos que se tienen disponibles para estos análisis son insuficientes.

El cálculo del peligro sísmico (mostrado en la Figura 12) requiere conocer las zonas sísmicas, la frecuencia de ocurrencia, la relación de magnitud- recurrencia y las ecuaciones de las leyes de atenuación, que nos permita hacer la sumatoria de los efectos que ocasionan en el sitio las diversas fuentes sísmicas.

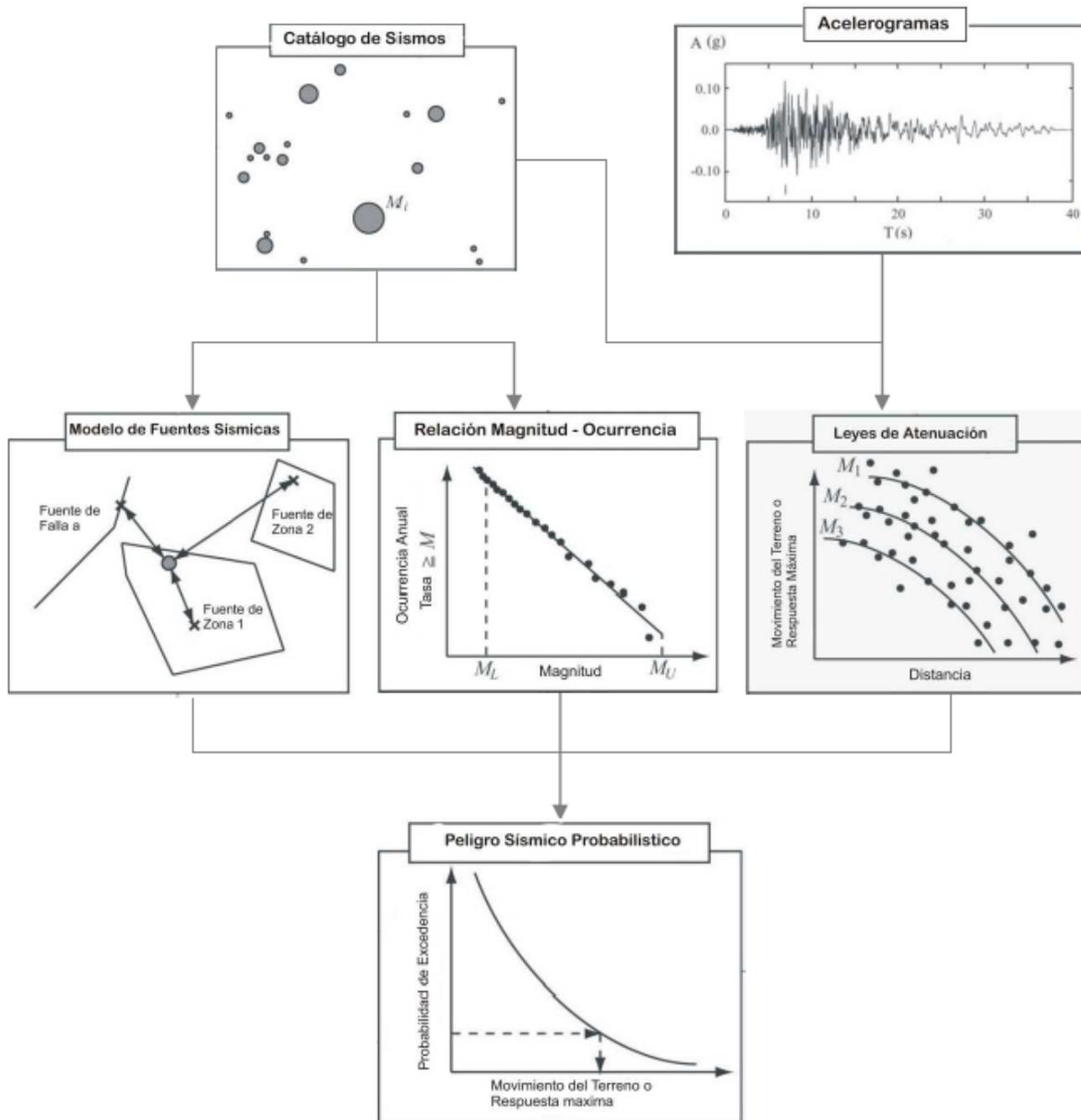


Figura 12 Procedimiento para evaluar el peligro sísmico. Tomada de García et al (2012).

Para la realización del análisis de peligro sísmico en México se realizó una división de las fuentes generadoras de sismos, otorgando a ellas una tasa de temblores por unidad de área. En estas se genera la función $\lambda_i(M)$ para determinar la tasa de excedencia que ocurre en cada una de ellas, expresando la frecuencia con la que un temblor supera una magnitud dada. La ecuación está dada (CFE, 2015) por:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (9)$$

Para $M_0 \leq M \leq M_u$

Donde:

M_0 = mínima magnitud relevante.

λ_0 , β y M_u = parámetros que definen la tasa de excedencia de cada fuente sísmica.

Por otra parte, a pesar de que la ecuación anterior se adapta a la mayoría de los tipos de temblores, para los de tipo subducción con magnitud mayor a 7 es necesario evaluar la siguiente ecuación:

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{\Phi\left(\frac{(M_u - E(M))}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{(M - E(M))}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{(M_u - E(M))}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{(M_0 - E(M))}{\sigma}\right)} \quad (10)$$

Para $M_0 \leq M \leq M_u$

Donde:

λ_0 , $E(M)$, σ = parámetros que deben estimarse estadísticamente para la zona mexicana de subducción.

$\Phi(.)$ = función de distribución normal estándar.

A pesar de conocer la magnitud y la distancia al epicentro, la intensidad sísmica sigue siendo una variable con incertidumbres.

Se hace la suposición de que al contar con los datos de magnitud y distancia es posible expresar la intensidad (S_a) como una variable con distribución lognormal, con media $A_m(M,R)$ dada por la ley de atenuación utilizada y una desviación típica del logaritmo natural igual a $\sigma_{\ln A}$.

Por lo tanto, la probabilidad de que la aceleración espectral (S_A) de un lugar supere un valor dado (S_a) esta expresada como:

$$\Pr(S_A > S_a | M, R) = 1 - \Phi\left(\frac{1}{\sigma_{\ln A}} \ln \frac{S_a}{A_m(M, R)}\right) \quad (11)$$

Para $A \geq 0$

$\Phi(\cdot)$ = función de distribución normal estándar.

Para hacer la evaluación del peligro de nuestra zona, es necesario determinar la sismicidad de las fuentes que la afectan, lo cual se hace con la siguiente ecuación:

$$v_i(S_a) = \sum_j w_{ij} \int_{M_0}^{M_u} \left(-\frac{d\lambda(M)}{dM}\right) \Pr(S_A > S_a | M, R) dM \quad (12)$$

Donde:

j = índice para cada uno de los subelementos en que se ha subdividido la fuente.

M_0, M_u =menor y mayor magnitud consideradas en el análisis.

$\Pr(S_A > u | M, R_{ij})$ = probabilidad de que la aceleración exceda el valor u en el sitio, dado que a la distancia R_{ij} se origina un temblor de magnitud M .

R_{ij} = distancias entre el sitio y la subelemento j de la fuente i

Posteriormente es necesario sumar todos los efectos de cada fuente, asignando un peso w_{ij} a cada subelemento proporcional a su tamaño, y de esta manera es posible determina nuestro peligro.

$$v(u) = \sum_{i=1}^N v_i(u) \quad (13)$$

Para la evaluación de estas cinco ecuaciones se utilizan los parámetros mostrados en las tablas 1.1 y 1.2 de CFE (2015).

3.5 Efecto de sitio

El efecto de sitio, o respuesta sísmica del sitio, es la variación o transformación que sufren las ondas sísmicas debido a las características topográficas y geológicas que presenta el suelo en un determinado sitio (Figura 13). Estos efectos generan diversas modificaciones en la amplitud de onda y por lo tanto en las afectaciones a las estructuras. Se ha encontrado (Vallejo, et al., 2002; Giner Caturla & Molina Palacios, 2001; Tsige & Garcia Flórez, 2006; Chávez-García & Montalva, 2014) que, en suelos con menor compactación, con baja densidad o con gran saturación de agua, se generan amplificaciones mayores de la onda sísmica.

Este efecto de sitio también depende de la existencia de fallas, ya que su existencia genera una porosidad secundaria al terreno, aumentando la cantidad de oquedades, disminuyendo su densidad y modificando así las propiedades mecánicas que tiene el terreno.

El análisis de las áreas cercanas a las zonas de falla es indispensable, para determinar hasta qué punto se ve afectada la densidad del suelo, y mediante esta información poder determinar la influencia que puede tener la presencia de la falla sobre la propagación de ondas sísmicas, y de ser necesario hacer las modificaciones correspondientes en el peligro sísmico.

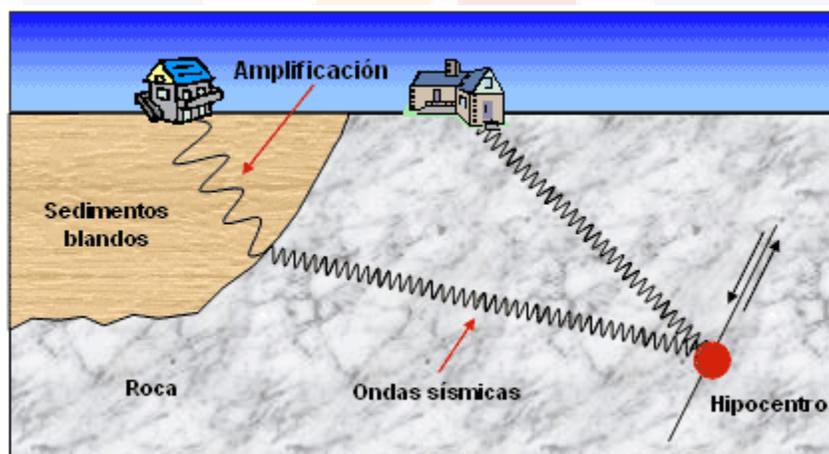


Figura 13 Amplitud de onda en roca y en sedimentos blandos. <http://www.lis.ucr.ac.cr/239>.



**CAPÍTULO IV:
RESULTADOS**

CAPITULO IV: RESULTADOS

Para llevar a cabo la campaña experimental de esta investigación fue necesario localizar dos lugares que presentan afectaciones debido a la subsidencia, tomando en cuenta que estos tuvieran el espacio adecuado para la realización de las mediciones necesarias, así como que fueran lugares a los que se pueda acceder sin tener complicaciones.

En los dos lugares seleccionados se realizaron estudios de resistividad eléctrica y estudios de sísmica. La elección de estos lugares fue debido a que en el año 2019 ambos sitios presentaron actividad que género afectaciones a los bienes inmuebles aledaños.

4.1 Primera zona de estudio

La primera zona de estudio está ubicada en el fraccionamiento Misión de Santa Fe (Figura 14), en el municipio de Aguascalientes. El punto central de la zona de estudio es aproximadamente en las coordenadas 13Q 782008.68 m E, 2420466.61 m N.

La falla que se estudia tiene el nombre de “Falla Vistas del Sol” otorgado por el Sistema de Información de Fallas y Grietas Geológicas “SIFAGG”.

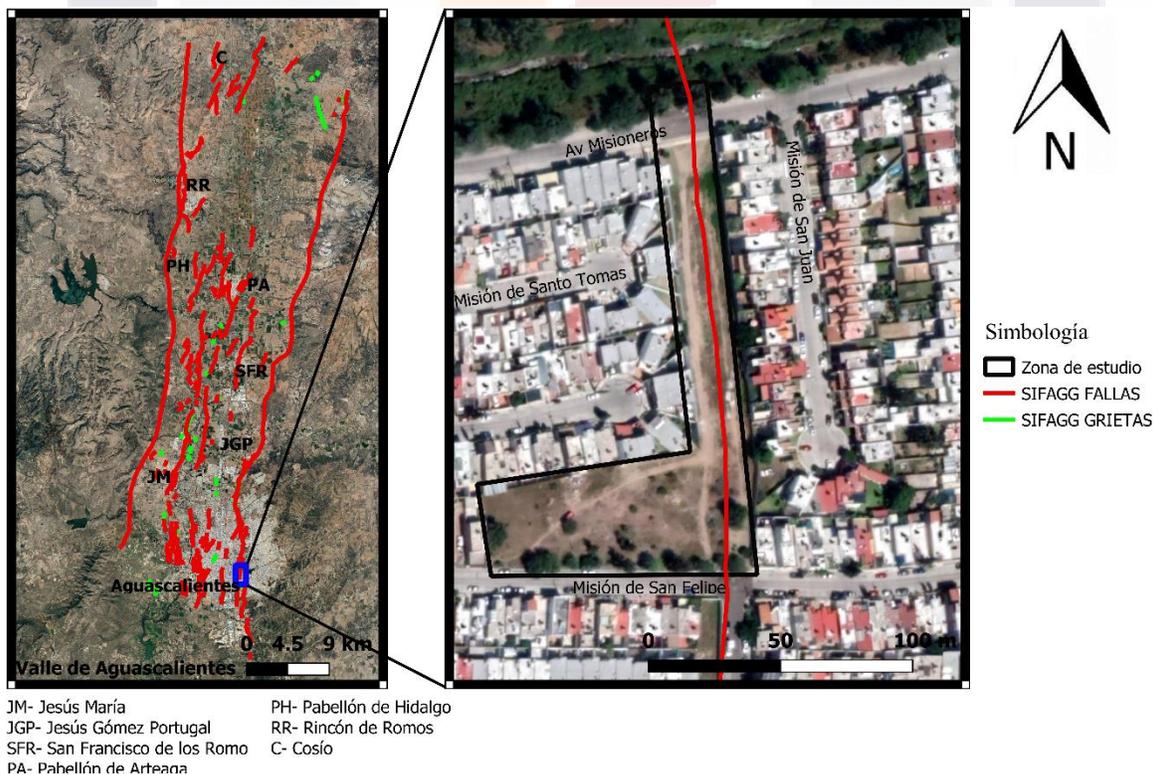


Figura 14 Ubicación de la primera zona de estudio. Falla Vistas del Sol.

En esta zona se tiene un área baldía en los lados de la fractura, siendo un aproximado de 9 metros a cada lado. El largo donde es posible realizar las mediciones es de aproximadamente 160 metros.

Aquí se realizaron una serie de TER perpendiculares a la falla (Figura 15), a cada 5 metros aproximadamente, lo que generó un total de 30 perfiles de TER. Cada uno de ellos tiene una separación de electrodos de 0.85 metros siendo en total una longitud de 19.55 metros.

En estos estudios se utilizó un arreglo Dipolo-Dipolo. Los 30 TER elaborados en la franja baldía se enumeran de norte a sur.

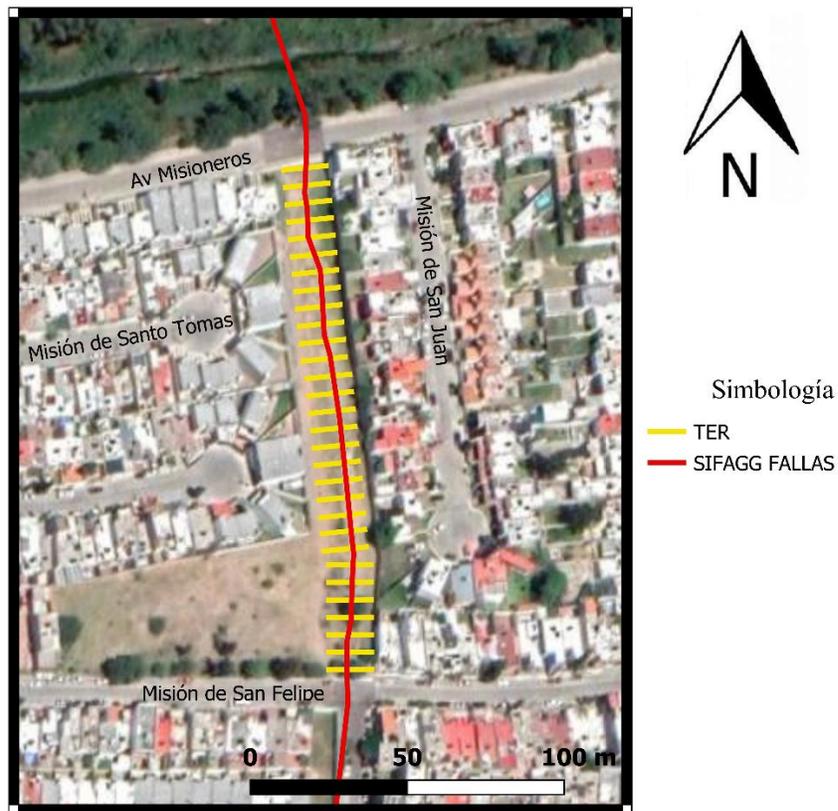


Figura 15 Distribución de TER en la primera zona de estudio.



Figura 16 Instalación de equipo para TER, primera medición. Falla Vistas del Sol.

Para esta zona se obtuvieron los perfiles de resistividad ilustrados de la Figura 17 a la Figura 25, cabe mencionar que todos están ubicados en la misma zona, por lo que esta solo se describirá en la primera imagen.

A partir de ellos se puede observar la variación que existe en los estrados del terreno, en donde se puede ver que, en las partes cercanas a la falla, las resistividades aumentan, dando a notar la existencia de mayores oquedades en estas áreas.

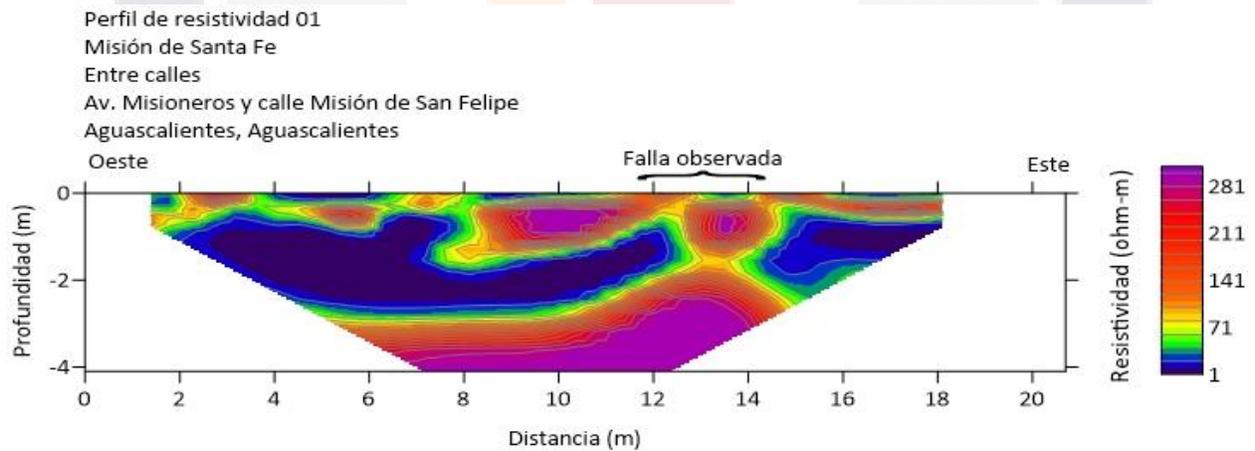


Figura 17 Perfil de resistividad 01 Falla Vistas del Sol (FVDS).

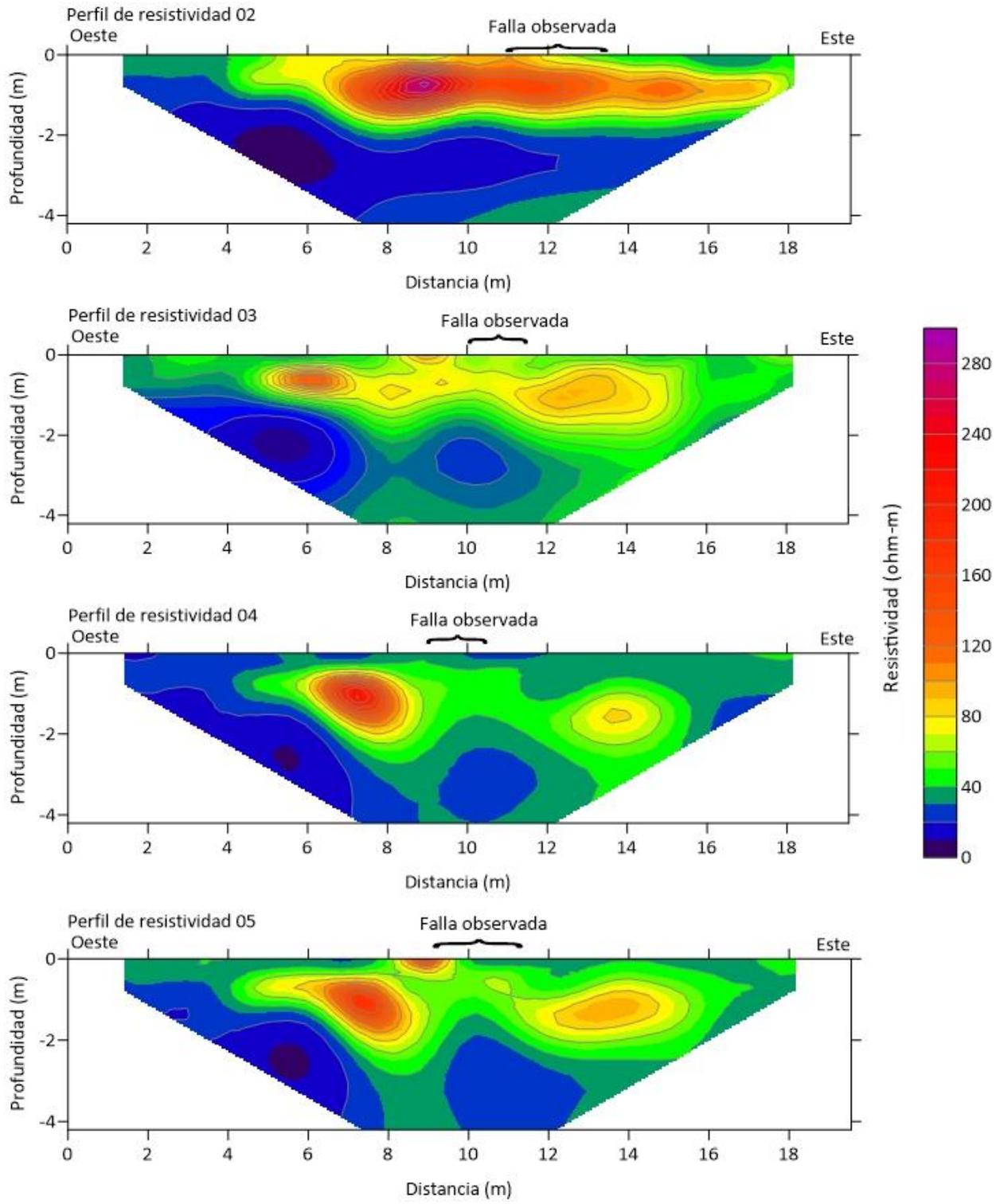


Figura 18 Perfiles de resistividad 02 al 05 FVDS.

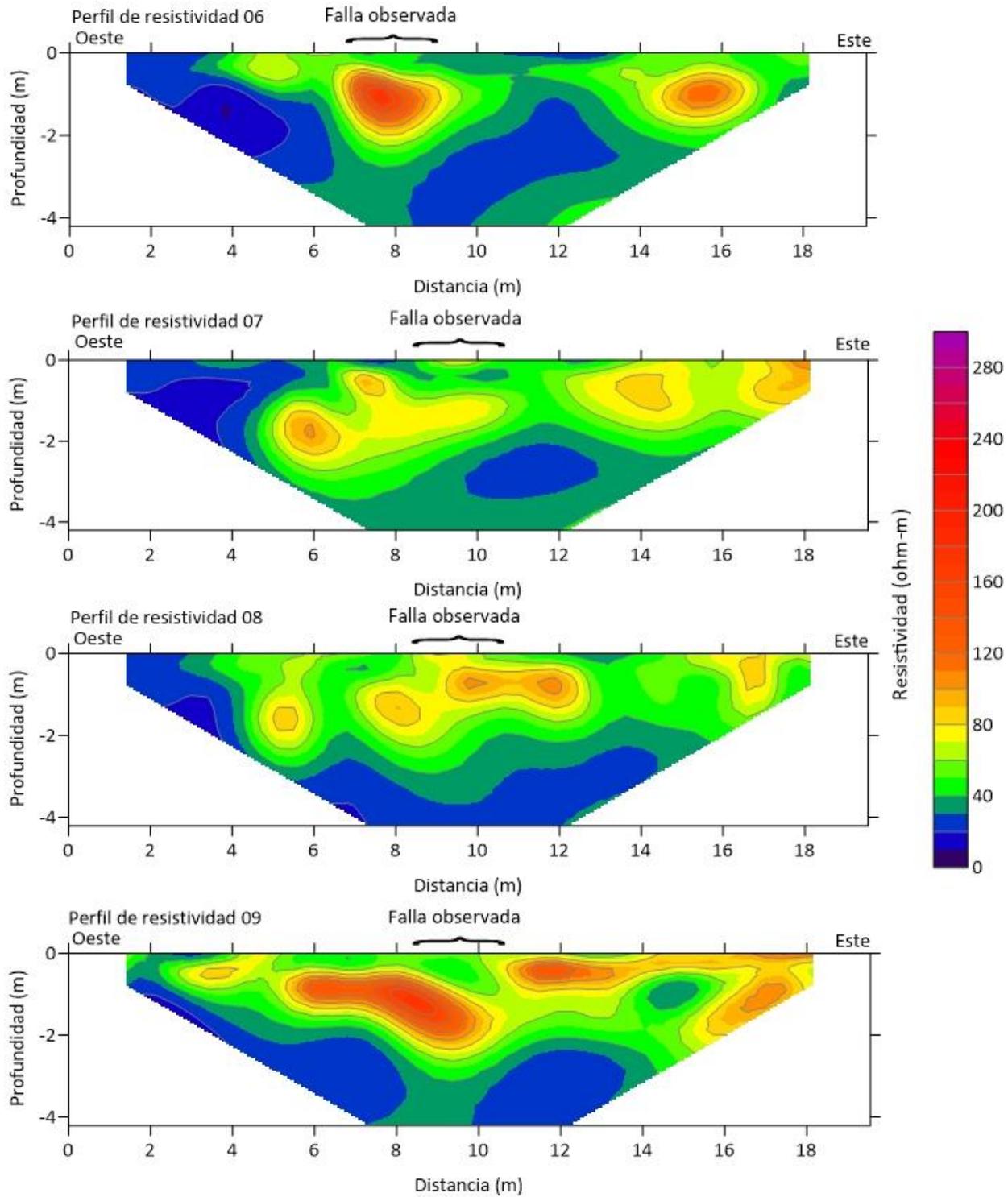


Figura 19 Perfiles de resistividad 06 al 09 FVDS.

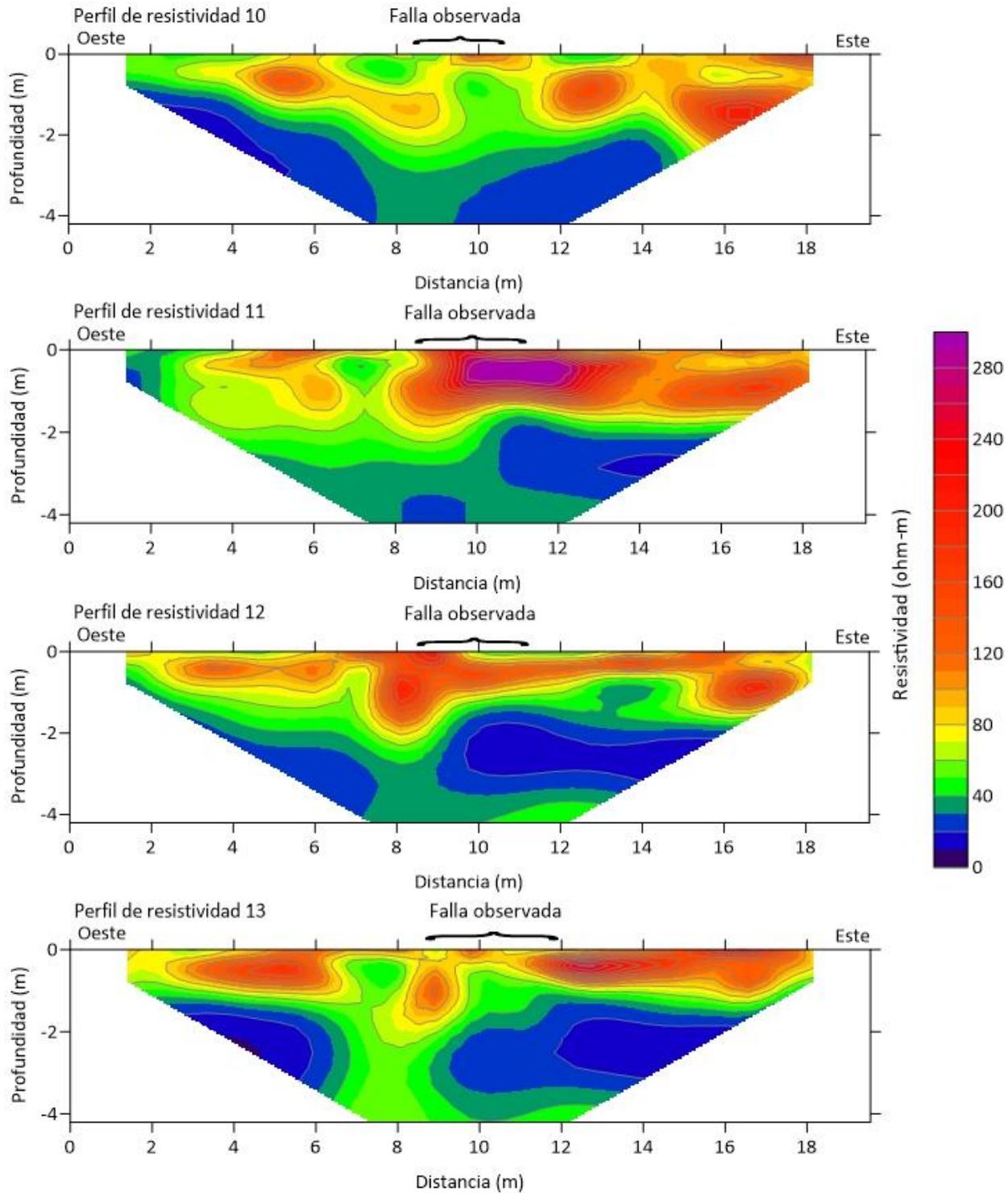


Figura 20 Perfiles de resistividad 10 al 13 FVDS.

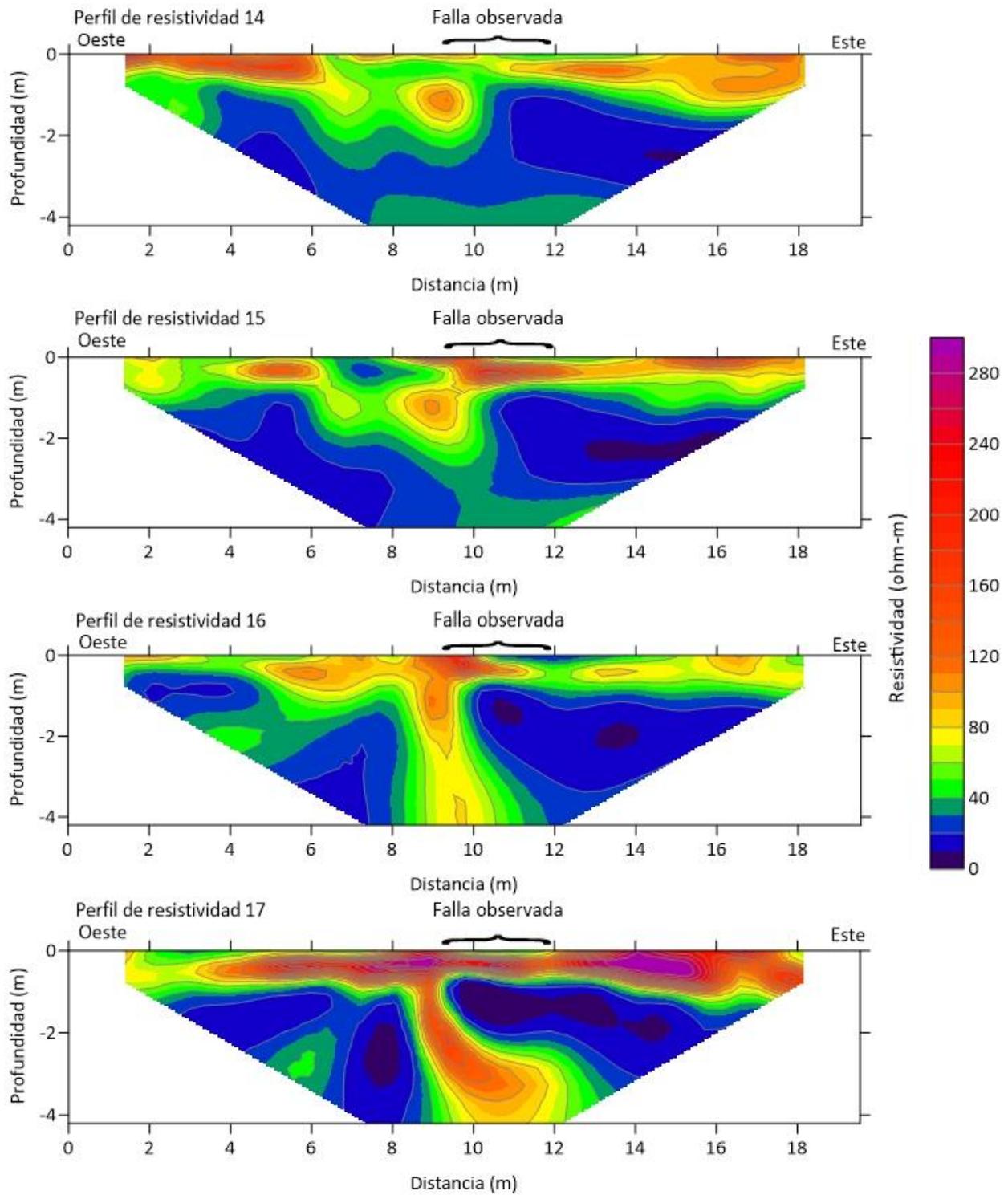


Figura 21 Perfiles de resistividad 14 al 17 FVDS.

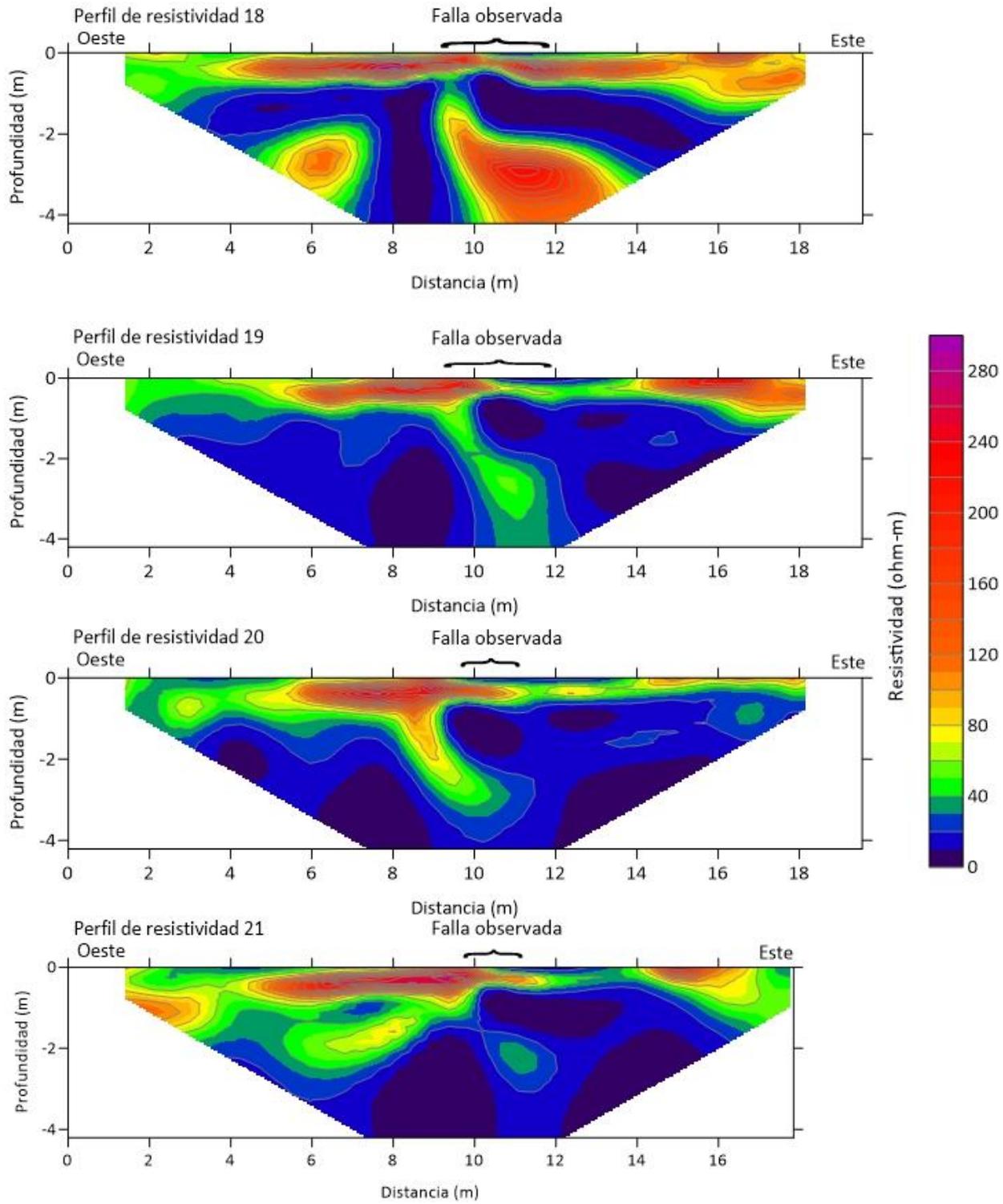


Figura 22 Perfiles de resistividad 18 al 21 FVDS.

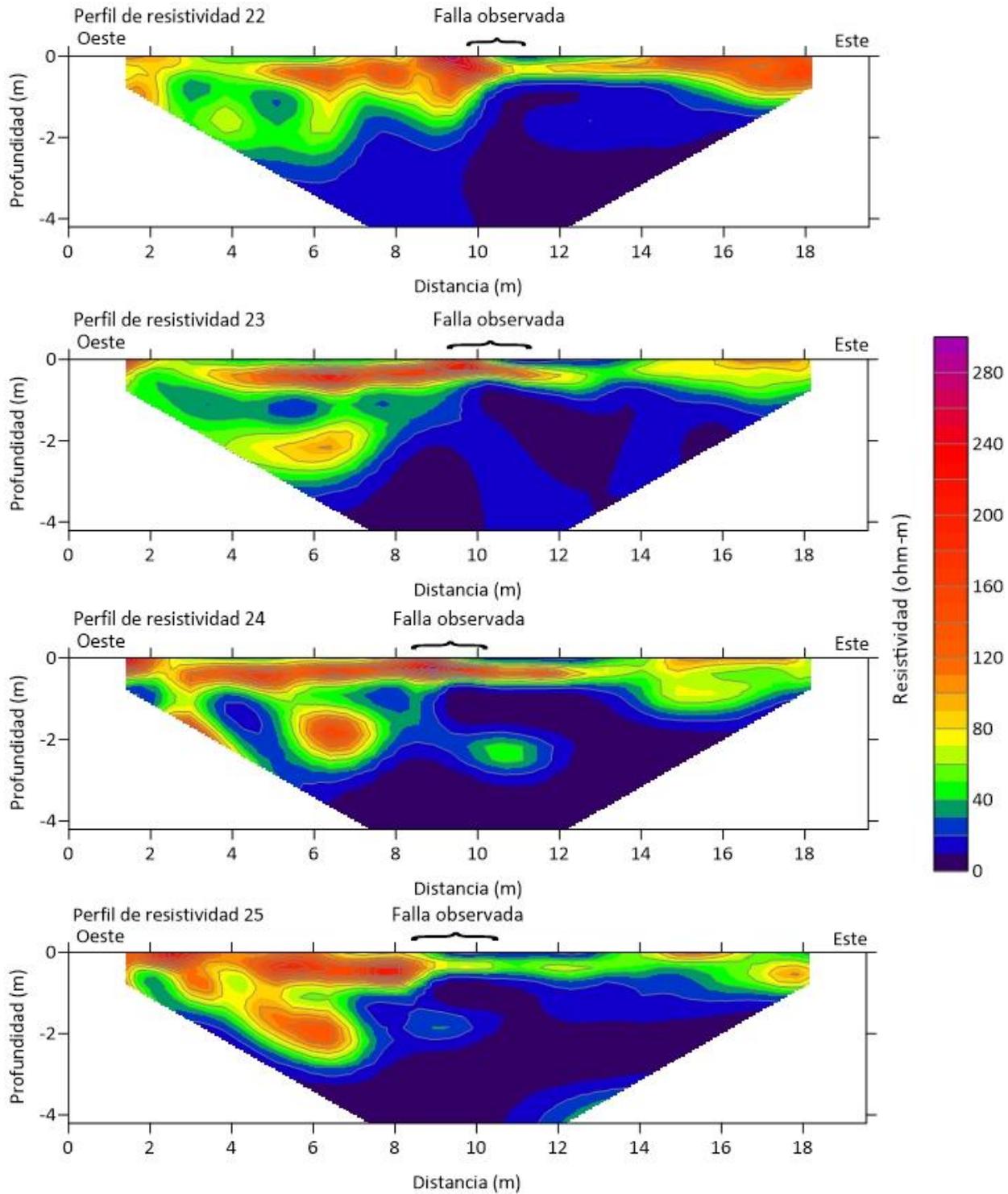


Figura 23 Perfiles de resistividad 22 al 25 FVDS.

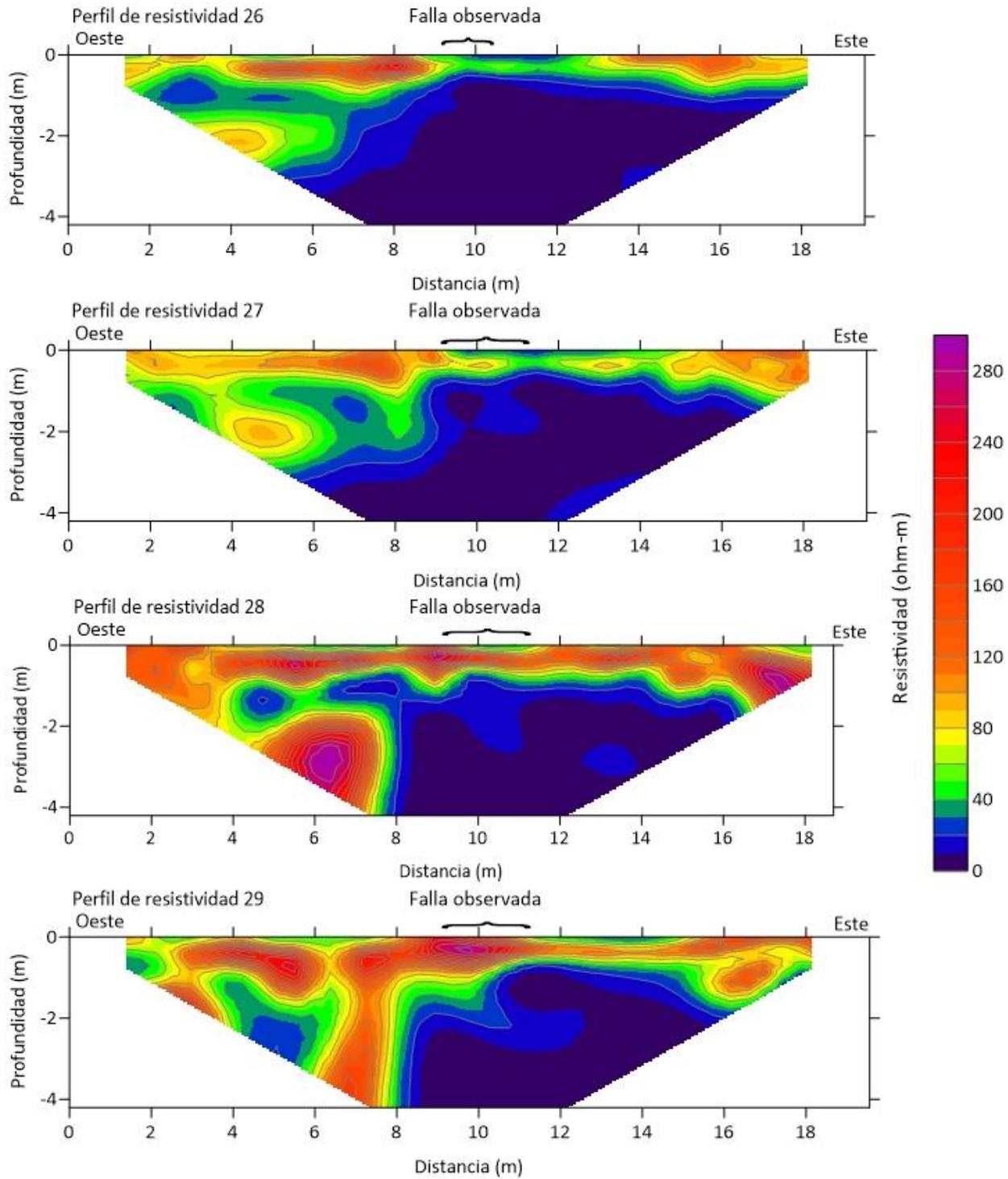


Figura 24 Perfiles de resistividad 26 al 29 FVDS.

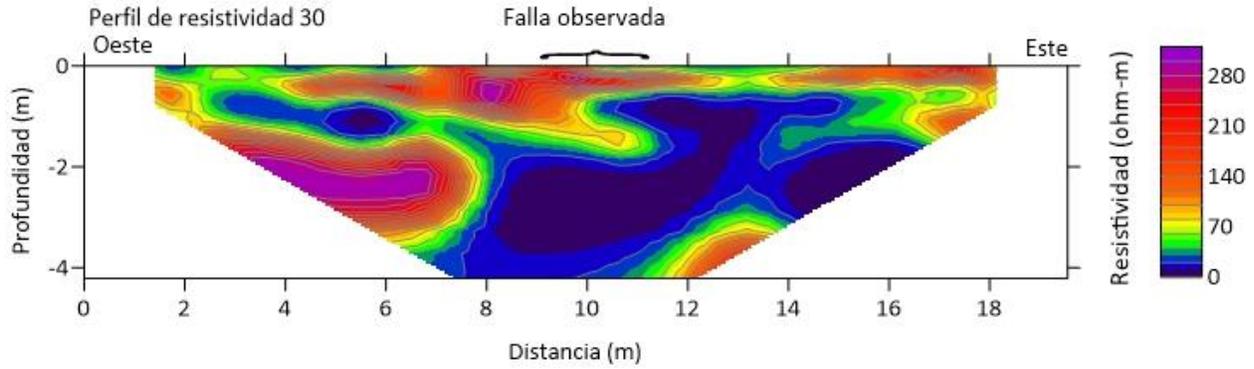


Figura 25 Perfil de resistividad 30FVDS.

Estas mediciones no fueron concluyentes debido a la poca profundidad de exploración alcanzada, con lo que se observa sólo los primeros 4 metros del subsuelo, en donde se puede interpretar que existen variaciones debidas a la acción humana.

Se levantaron cuatro mediciones más localizadas en la parte sur de la zona (Figura 26), con el fin de explorar a una profundidad mayor el efecto o alteración que la falla genera en el terreno. Durante el levantamiento de estos perfiles se observaron daños en una pared, a 25 metros del escarpe de la falla (Figura 27), lo que sugiere que el ancho de la traza de la falla se extiende hasta dicho punto. Estas mediciones se enumeraron de la 31 a la 34 de norte a sur.



Figura 26 Distribución de segunda parte de TER. Primera zona.



Figura 27 Afectación en pared aledaña.

Estas mediciones se realizaron con una separación de electrodo de 4 metros, logrando abarcar una longitud total de 92 metros y una profundidad de 18 metros aproximadamente.

Los modelos de resistividad obtenidos de estos perfiles se pueden ver en la Figura 28, en donde se observa que en efecto existe una variación en la resistividad en un área mayor a la que se tenía analizada, además que, la afectación presente en la pared está dentro del ancho de afectación de la falla, indicando la extensión que puede llegar a alcanzar la zona de alteración de la falla.

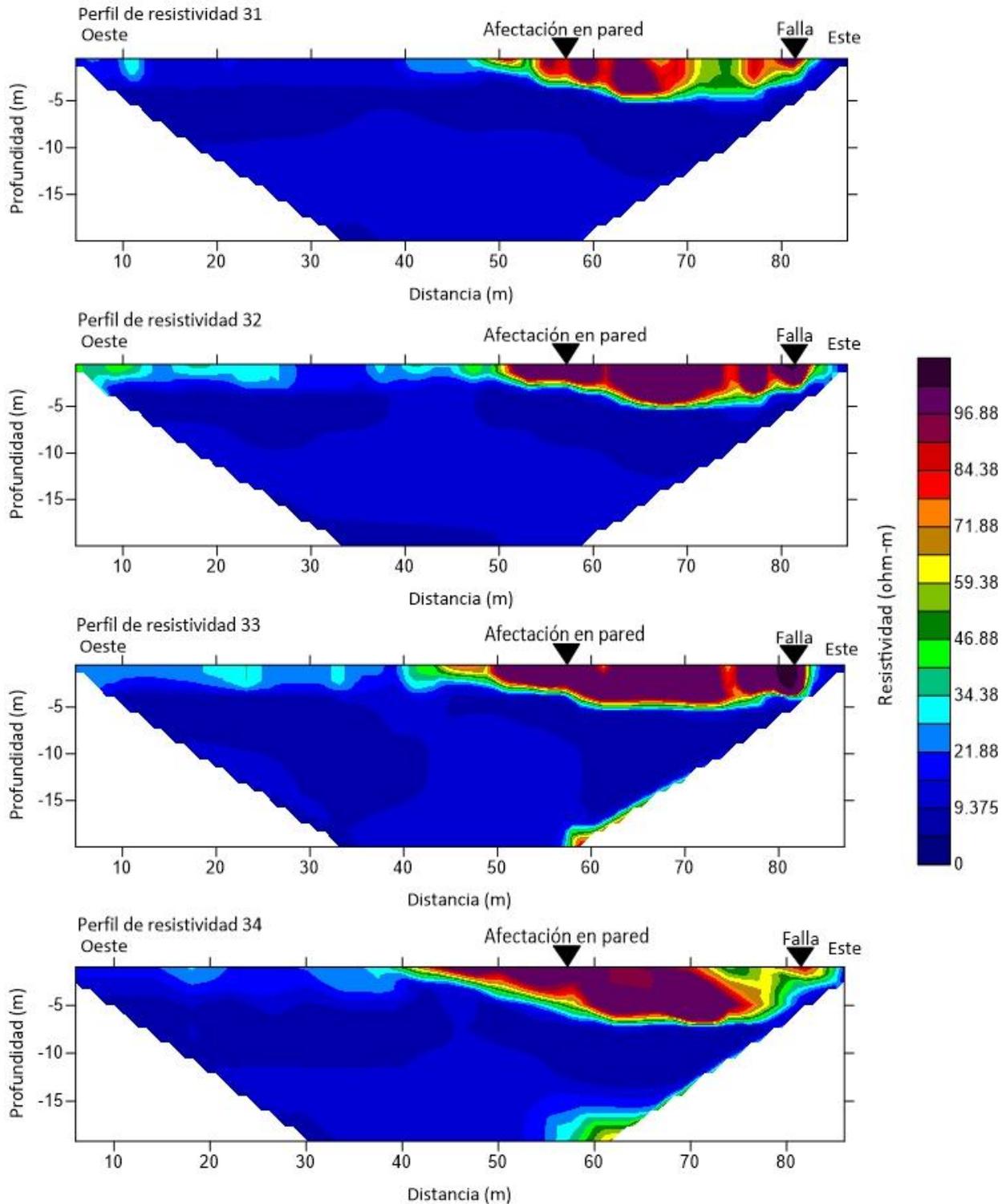


Figura 28 Perfiles de resistividad 31 al 34 FVDS.

Con base en estos resultados se planteó la elaboración de diversas mediciones de MASW 1D en el área donde se observa la afectación según la resistividad encontrada. Estos perfiles se

realizaron con una separación de geófonos de 1.5 metros de forma paralela a la falla y se encuentran distribuidos según la Figura 29.



Figura 29 Distribución de los estudios MASW 1D en primera zona.

De la Figura 30 a la Figura 32 se muestran los modelos 1D obtenidos de cada medición, graficando la velocidad de onda cortante (V_s) contra la profundidad alcanzada.

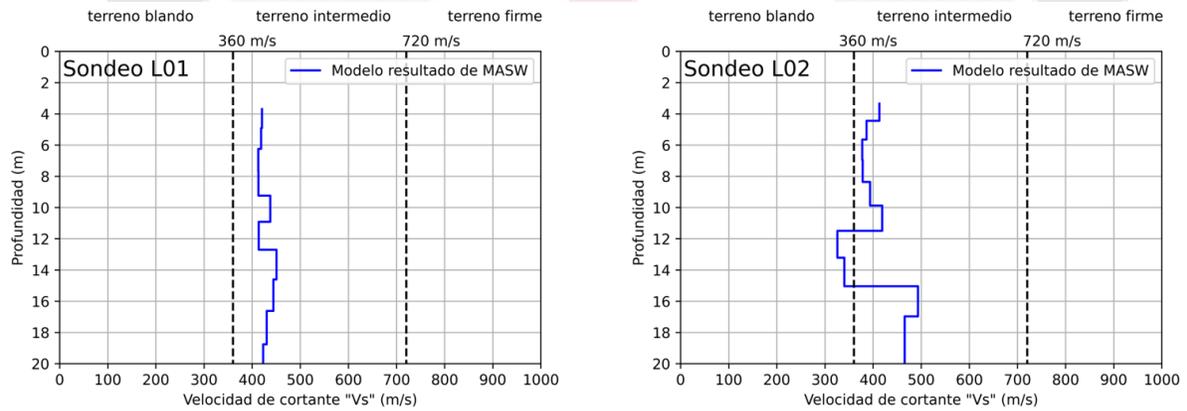


Figura 30 MASW 1D 1 y 2 FVSD.

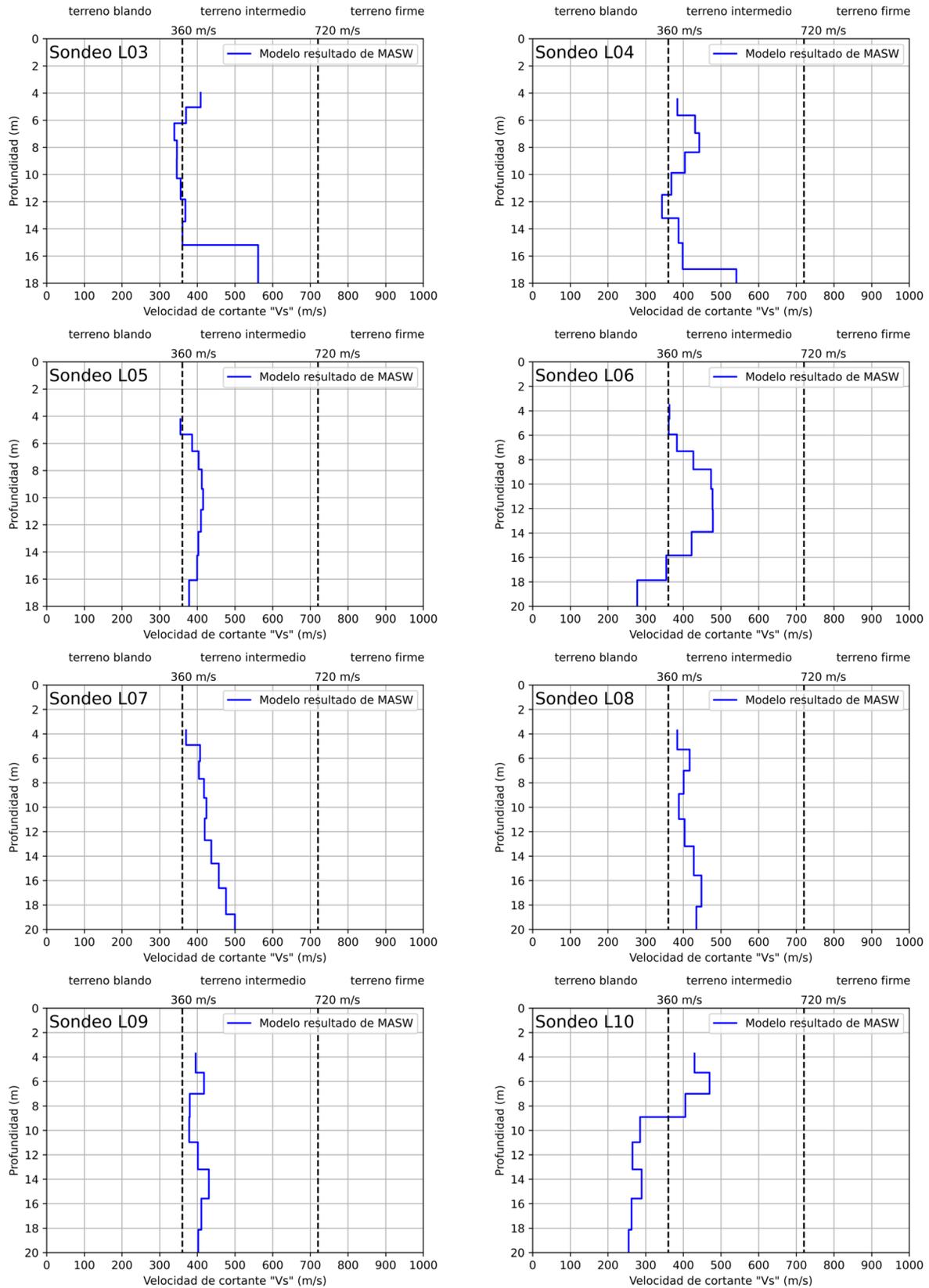


Figura 31 MASW ID 3 al 10 FVSD.

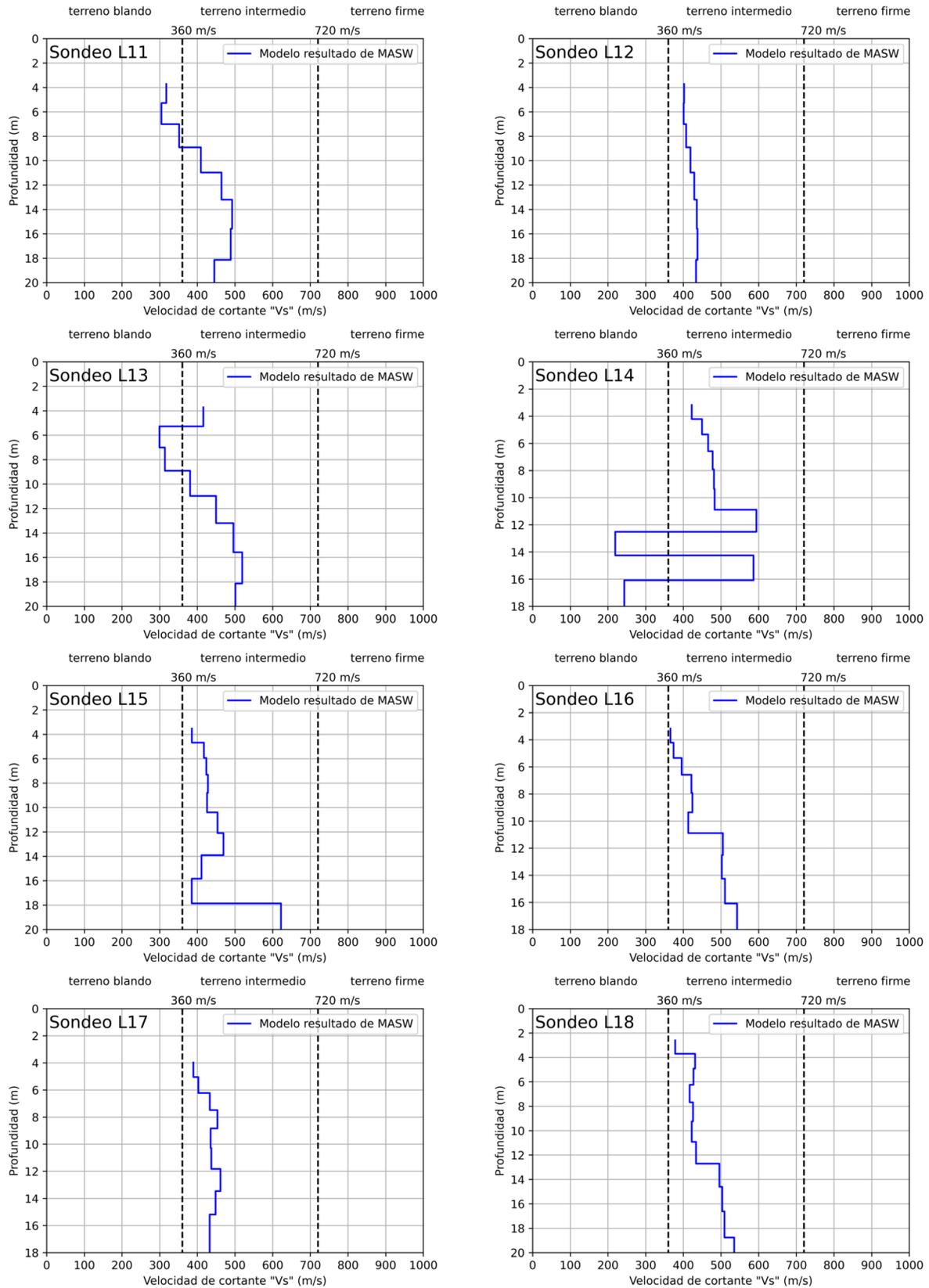


Figura 32 MASW 1D 11 al 18 FVSD.

Con base en estas gráficas se realizó la interpolación de los resultados obtenidos, generando así el perfil de velocidades de onda cortante mostrado en la Figura 33.

En la figura se observan las variaciones que se tienen en la V_s a diferentes profundidades. Se observa que se presentan zonas con disminuciones en la velocidad de cortante, sin embargo, son franjas angostas que parecen definir el desarrollo del fracturamiento a profundidad. Son franjas de velocidad de cortante muy localizadas y angostas, no se configuran como una anomalía de baja velocidad en todo el ancho de la traza de la falla definida por la anomalía resistiva de la Figura 28 por lo que no hay una modificación significativa del efecto de sitio.

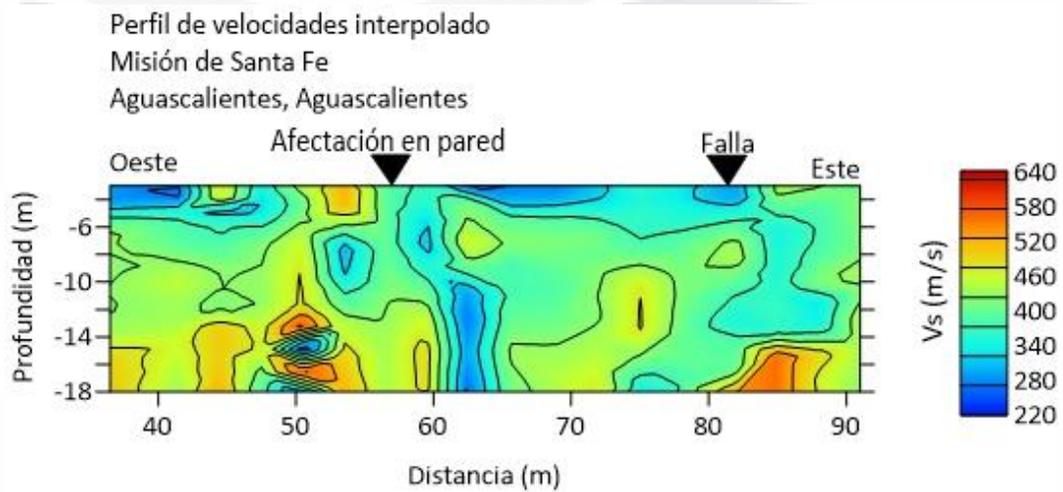


Figura 33 Interpolación MASW 1D FVDS.

4.2 Segunda zona de estudio



Figura 34 Ubicación de la segunda zona de estudio. Falla Aurero 1.

El segundo lugar estudiado fue la zona de Villas de Guadalupe (Figura 34), en el municipio de Jesús María. El cual se encuentra aproximadamente en las coordenadas 13Q 776236.62 m E, 2437349.29 m N. Solo que, a diferencia de la primera zona de estudio, esta abarca un área mayor, ya que dentro de la comunidad se han observado daños en diferentes puntos.

La falla estudiada tiene el nombre de “Falla Aurero 1” llamada así por el SIFAGG. Adicional a esta falla se encuentra otra fractura localizada dentro del poblado, mostrada en la Figura 34 con un color verde, la cual está registrada como grieta dentro del sistema de SIFAGG, esta grieta tiene el mismo nombre que la falla “Falla Aurero 1”. Para esta investigación se tomaron en cuenta tanto la falla, como la grieta de esta zona.

Para esta zona de estudio se realizaron una serie de SEVs, calicatas y TERs, ubicados en puntos estratégicos para la caracterización de las fracturas observadas (Figura 35).

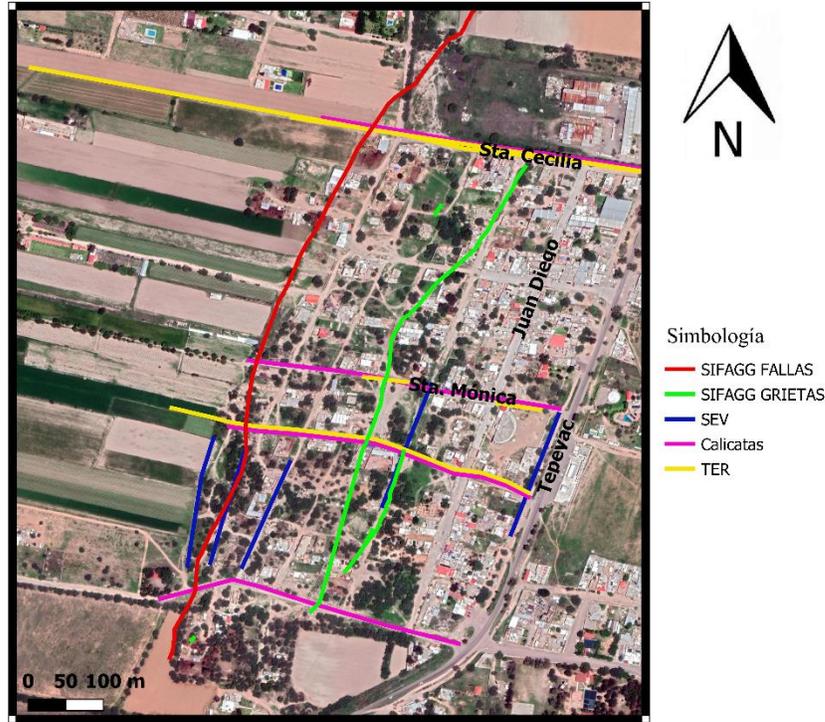


Figura 35 Distribución de los diferentes estudios en la segunda zona de análisis.

Primeramente, se llevaron a cabo 5 SEV, enumerados de oeste a este según la ubicación de la Figura 35, en los cuales se realizaron un total de 10 mediciones en cada uno de ellos. Los datos obtenidos de estas mediciones se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4.

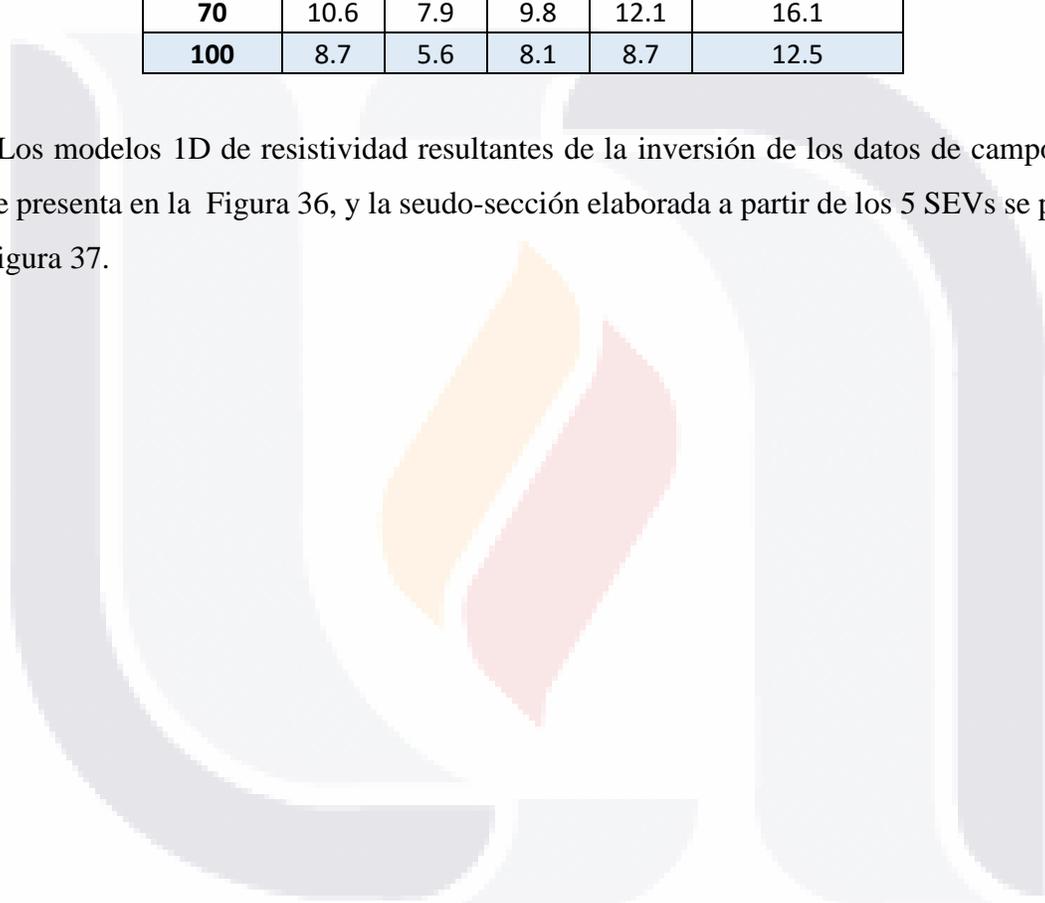
Tabla 3 Datos obtenidos de los SEV.

Dato	AB/2 (m)	MN/2 (m)	Resistividad Rho (ohm-m)					
			SEV01	SEV02	SEV03	SEV04	SEV05	SEV05 ajustado
1	2	1	11	25.9	36.9	22.2	32.5	32.5
2	4	1	9.3	22.5	22.9	18.8	20.9	20.9
3	10	1	8.3	21.2	22.6	14.9	14.4	14.4
4	10	5	10.2	25.4	26.1	17.6	61.8	17.5
5	20	5	10.2	17.8	20.5	20.7	18	18
6	30	5	14.7	17.6	20.6	23.3	22.9	22.9
7	50	5	15.1	14.8	16.6	19.7	24.2	24.2
8	50	10	15.9	14.9	16.4	19	27.5	27.5
9	70	10	13.3	12.2	13.1	14.1	22.5	22.5
10	100	10	11.4	9.9	11.4	10.7	18.9	18.9

Tabla 4 Datos de SEV corregidos.

AB/2 (m)	Resistividad Rho (ohm-m)				
	SEV01	SEV02	SEV03	SEV04	SEV05 ajustado
2	11	25.9	36.9	22.2	32.5
4	9.3	22.5	22.9	18.8	20.9
10	8.3	21.2	22.6	14.9	14.4
20	8.3	13.6	17	18	14.9
30	12.8	13.4	17.1	20.6	19.8
50	13.2	10.6	13.1	17	21.1
70	10.6	7.9	9.8	12.1	16.1
100	8.7	5.6	8.1	8.7	12.5

Los modelos 1D de resistividad resultantes de la inversión de los datos de campo de los SEVs se presenta en la Figura 36, y la pseudo-sección elaborada a partir de los 5 SEVs se presenta en la Figura 37.



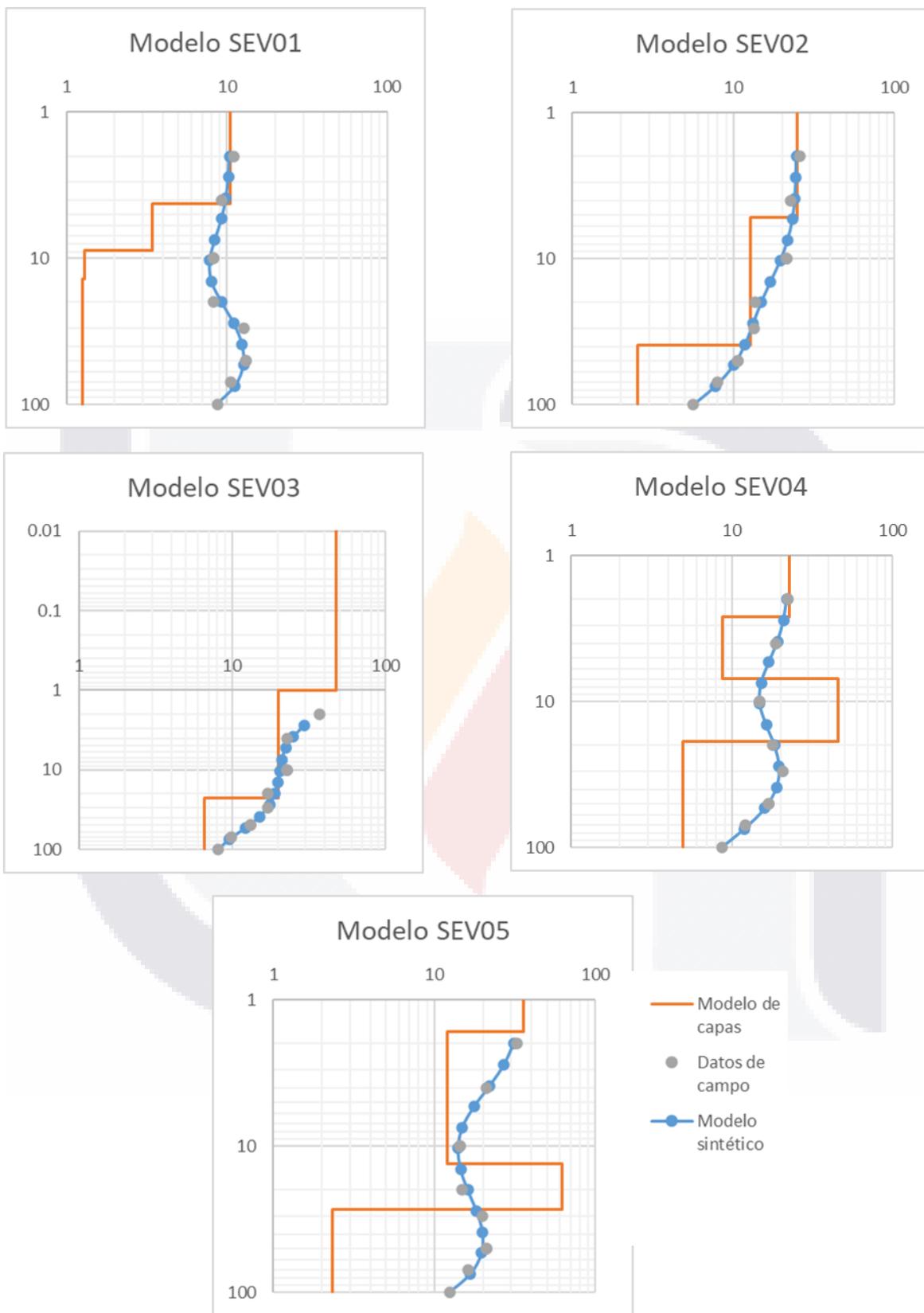


Figura 36 SEV modelos ajustados.

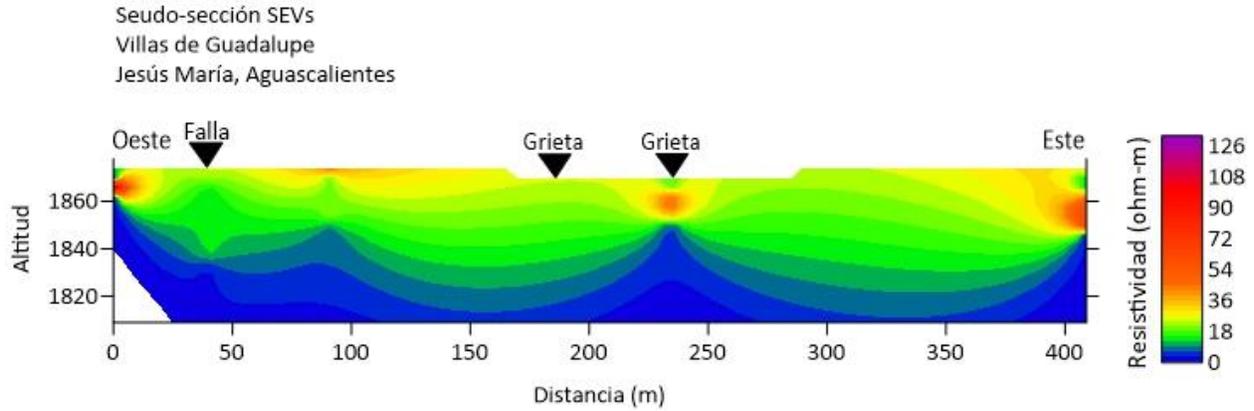


Figura 37 Seudo-sección SEVs VdG.

Adicionalmente, se realizaron 4 calicatas ubicadas en las calles Santa Cecilia, Santa Mónica, y dos calles más al sur, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Las calicatas fueron enumeradas por su posición de norte a sur, además de que las mediciones se realizaron con dirección oeste-este.

Tabla 5 Datos de resistividad en calicatas

Perfil 1		Perfil 2		Perfil 3		Perfil 4	
Cadenamiento	Rho	Cadenamiento	Rho	Cadenamiento	Rho	Cadenamiento	Rho
30	10.4	30	16.06	30	15.39	30	15.47
50	10.17	50	17.59	50	17.52	50	17.01
70	10.76	70	18.79	70	14.36	70	16.3
90	11.49	90	19.39	90	16.63	90	17.05
110	12.13	110	19.05	110	15.63	110	17.27
130	13.09	130	24.73	130	21	130	17.36
150	12.72	150	16.08	150	19.23	150	16.5
170	15.34	170	31.05	170	22.37	170	17.4
190	20.19	190	28.79	190	20.15	190	18.96
210	18.81	210	24.98	210	18.06	210	20.2
230	20.76	230	27.69	230	16.79	230	22.55
250	20.27	250	21.46	250	20.61	250	21.95
270	17.79	270	21.27	270	21.55	270	22.46
290	17.82	290	21.04	290	20.41	290	23.07
310	17.78	310	18.41	310	21.99	310	23.43
330	16.65	330	22.8	330	18.93	330	26.74
350	20.15	350	23.36	350	21.13	350	28.53
370	17.64	370	23.74	370	19.54	370	32.18
390	26.35	390	24.46	390	20.06	390	35.85
410	25.32					410	37.81
430	28.61					430	37.36

450	26.54				450	39.32
470	28.85				470	31.79
490	27.81					
510	33.34					
530	34.66					

Con base en estos datos se elaboraron los perfiles correspondientes, en los cuales se representa la variación de resistividad a lo largo de un perfil con la misma profundidad (Figura 38 a la Figura 41).

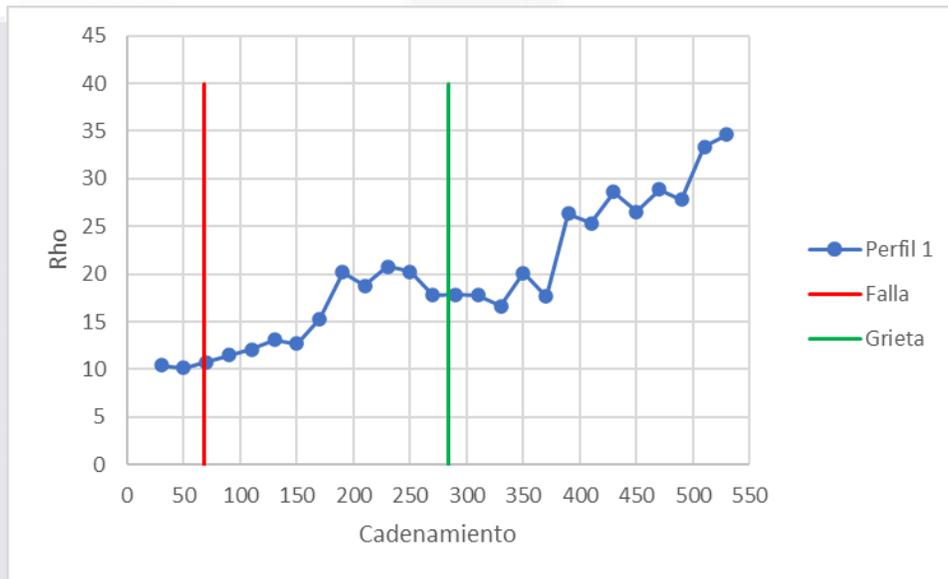


Figura 38 Perfil de calicata eléctrica #1.

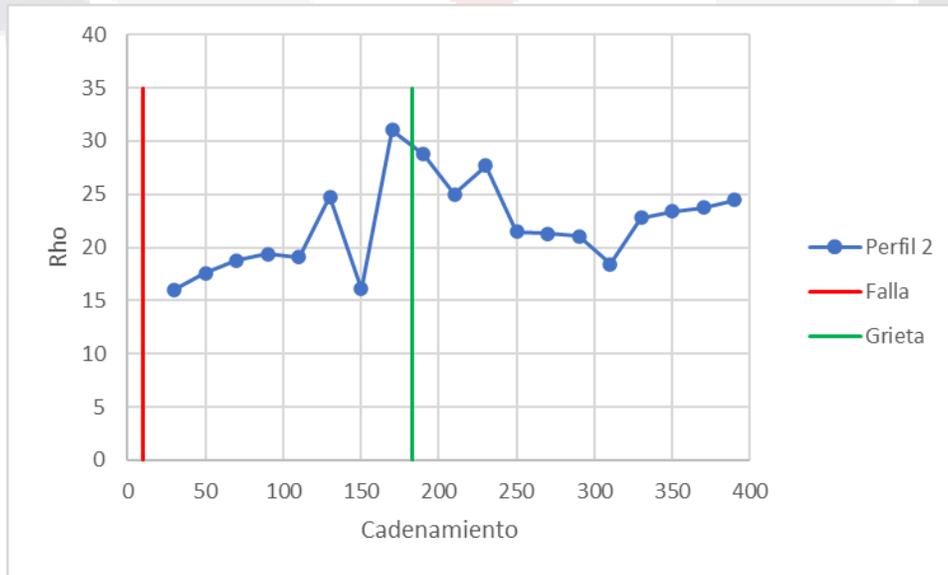


Figura 39 Perfil de calicata eléctrica #2.

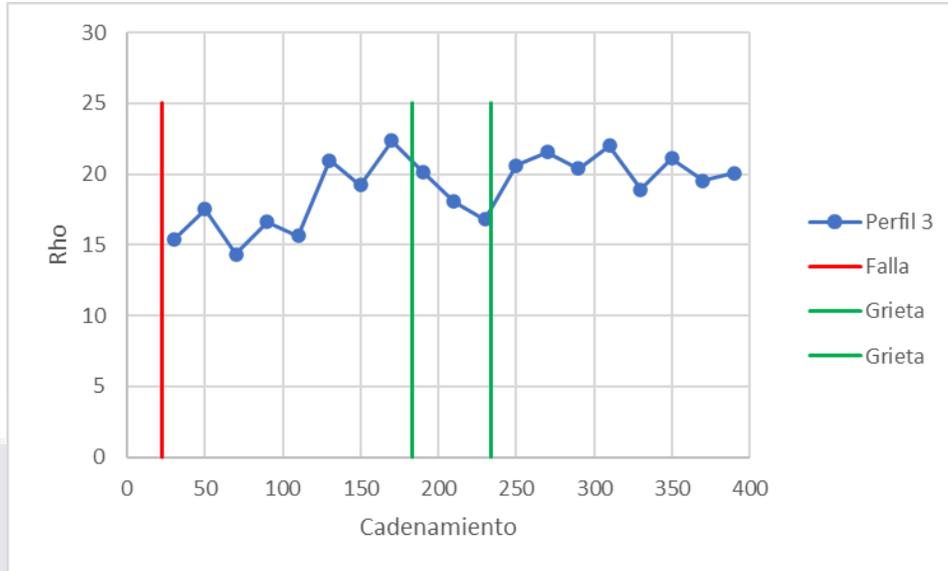


Figura 40 Perfil de calicata eléctrica #3.

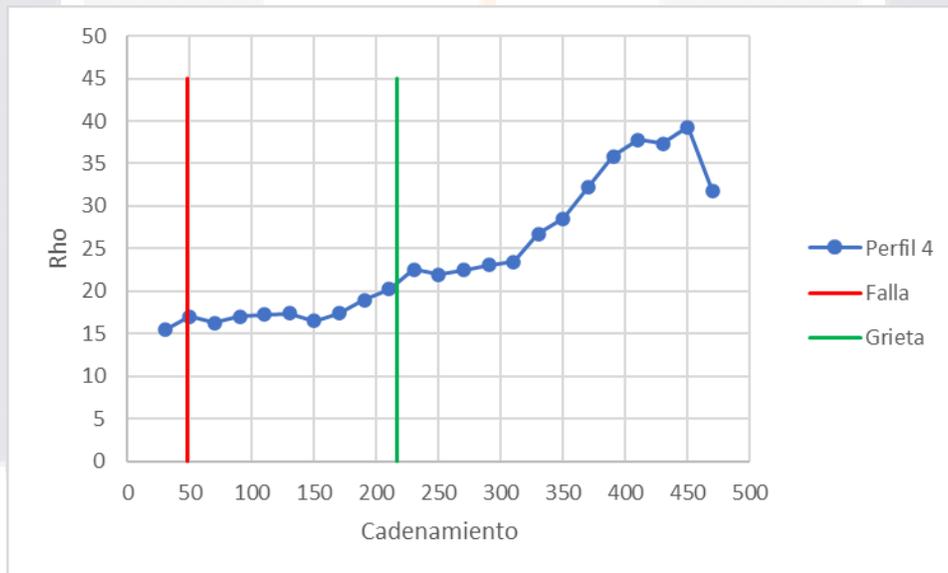


Figura 41 Perfil de calicata eléctrica #4.

Tanto los SEVs como las calicatas se realizaron con la finalidad de encontrar algún contraste, para después estudiarlo y caracterizarlo en su propagación de ondas sísmicas, sin embargo, estas mediciones no proporcionaron información alguna, por lo que se reportan aquí como mediciones realizadas, pero que no contribuyeron a obtener información.

Posteriormente en la zona se realizaron un total de 6 TER, comenzando por 2 ubicados al norte de la zona de estudio (TER01 y TER02), estos se realizaron en la calle Santa Cecilia, con una separación de electrodos de 10 metros. El TER01 se realizó con un resistivímetro marca

SuperSting, lo que nos permitió explorar una longitud total de 830 metros y una profundidad de 200 metros.

En el modelo del TER01 (Figura 42 a) se puede observar la existencia de una falla antigua, además de presentar la existencia de 2 nuevos estratos superiores, tanto en la zona de falla como en su alrededor, desde la formación de esta. La presencia de las discontinuidades en la superficie pueden ser indicadores de la reactivación de dicha falla.

En dicho perfil se muestra un rectángulo punteado perteneciente a el área abarcada por el segundo perfil (TER02).

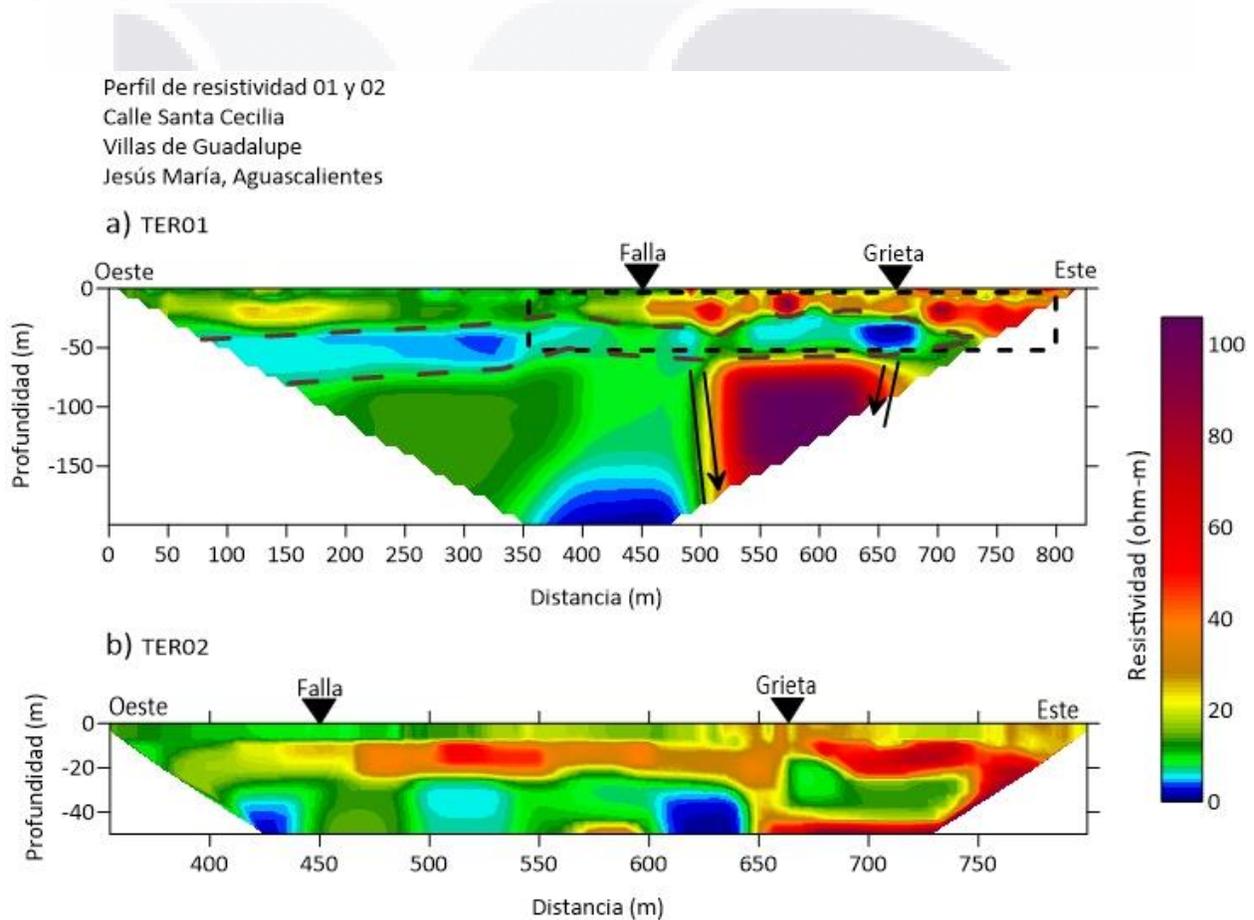


Figura 42 Perfil de resistividad 01 y 02 Villas de Guadalupe (VdG).

La segunda medición (Figura 42 b) se realizó con un resistímetro Syscal Junior, utilizando la función Run Roll along, para poder ampliar la longitud de la medición a 470 metros aproximadamente.

Con el TER02 fue posible alcanzar una profundidad de casi 50 metros, lo que permite observar la variación que existe en los estratos que conforman esta zona, en ellos es posible

identificar una inconsistencia lateral de los estratos, ya que en la parte este, se pueden observar resistividades mayores a la del resto del perfil. Las resistividades menores pueden ser debido a la existencia de humedad en el suelo, ya que una de las hipótesis del origen de los fracturamientos es que están asociados a la reactivación de un paleocauce.

Posteriormente se realizaron dos TER más, ubicados en la calle Santa Mónica, los cuales se cuentan con una separación de electrodos de 2.5 metros (TER03 y TER04), obteniendo así una longitud total de 57.5 metros, con un alcance de profundidad de aproximadamente 14 metros. El TER03 (Figura 43) es el localizado en la parte este de la zona y el TER04 en la parte central (Figura 44).

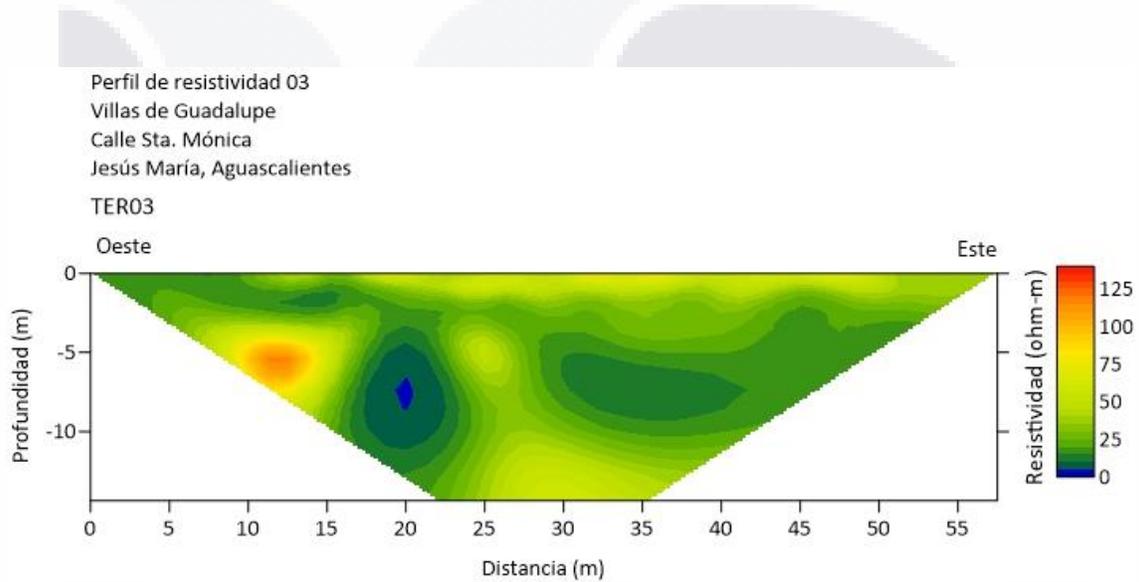


Figura 43 Perfil de resistividad 03 VdG.

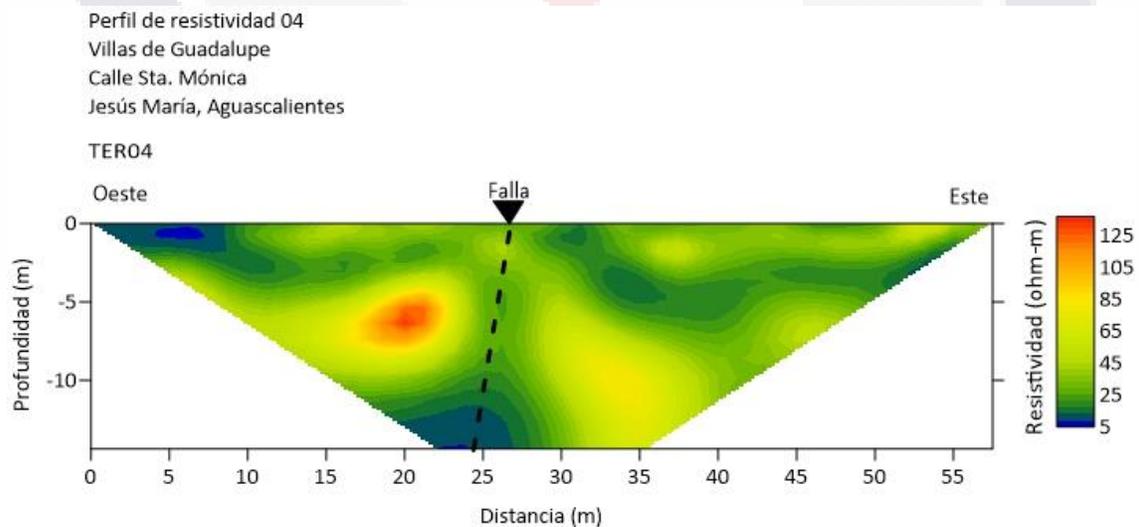


Figura 44 Perfil de resistividad 04 VdG.

Estos dos perfiles (Figura 43 y Figura 44) se realizaron con el fin de observar las variaciones que existen en la zona de falla y en la zona este que no presenta afectaciones, sin embargo, no existen diferencias notorias, aunque esto puede deberse a que, cuando se planteó realizar el estudio, se eligió tal lugar debido a que se generó una falla superficial, sin embargo al tiempo de la realización de la medición, la falla ya la habían tapado los pobladores de la colonia.

Los últimos dos TER fueron realizados una cuadra al sur de la calle Santa Mónica, estos fueron a una separación de electrodos de 10 y 5 metros (TER05 y TER06), utilizando el comando Run Roll along para poder abarcar longitudes de 470 y 465 metros respectivamente. En ellos se alcanza una profundidad de 50 y 25 metros respectivamente.

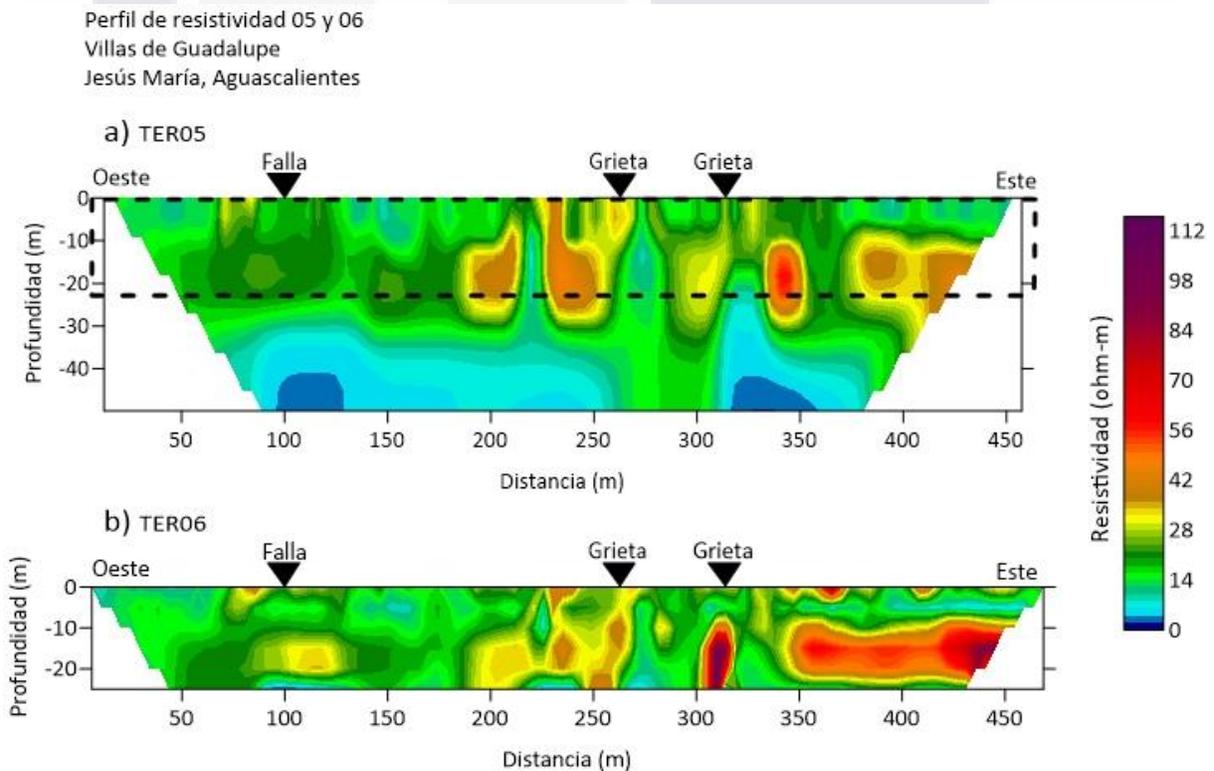


Figura 45 Perfil 05 y 06 VdG.

En los modelos resultantes (Figura 45) se pueden ver las variaciones que existe a lo ancho de toda la comunidad, observando varias discontinuidades laterales en los estratos, principalmente al centro de la zona, donde existen áreas de resistividades altas, debidas posiblemente a la existencia de oquedades o de material más grueso.

Con base en las diversas mediciones de resistividad se optó por realizar mediciones de sísmica a lo ancho de la parte central de la comunidad (una cuadra al sur de la calle Santa Mónica), que fue donde se encontraron mayores variaciones en las resistividades del suelo. Las mediciones

de sísmica se enumeraron de oeste a este comenzando con el número 101, y su ubicación se ve graficada en la Figura 46.



Figura 46 Distribución de los estudios MASW 1D en segunda zona.

De estas mediciones, las primeras 4 se realizaron con una separación de geófonos de 1.5 metros, sin embargo, al ver que se obtuvo poca profundidad en ellos, se optó por hacer el resto con una separación de 2.5 metros.

De la Figura 47 a la Figura 50 se muestran los resultados obtenidos de cada medición, graficando la velocidad de onda cortante (V_s) contra la profundidad alcanzada.

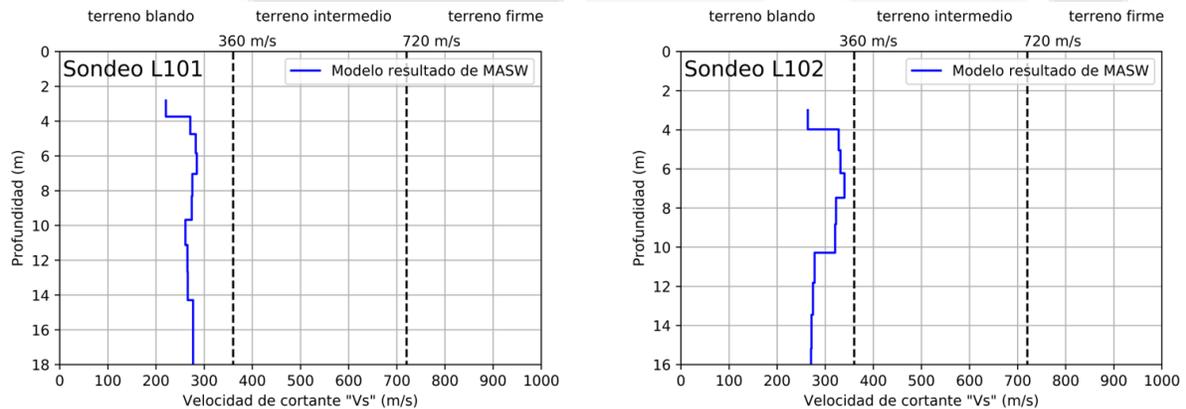


Figura 47 MASW 1D 101 y 102 VdG.

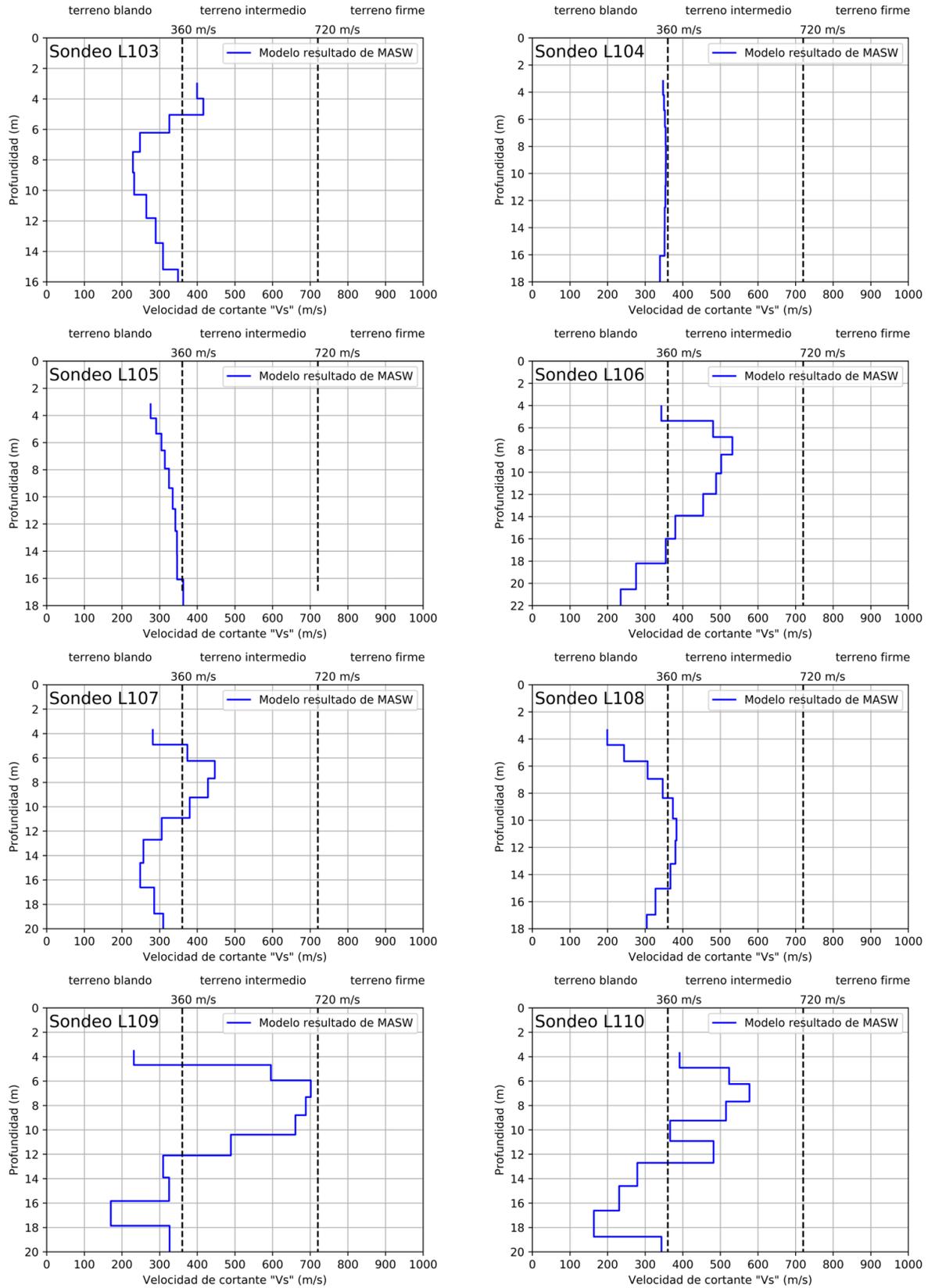


Figura 48 MASW ID 103 al 110 VdG.

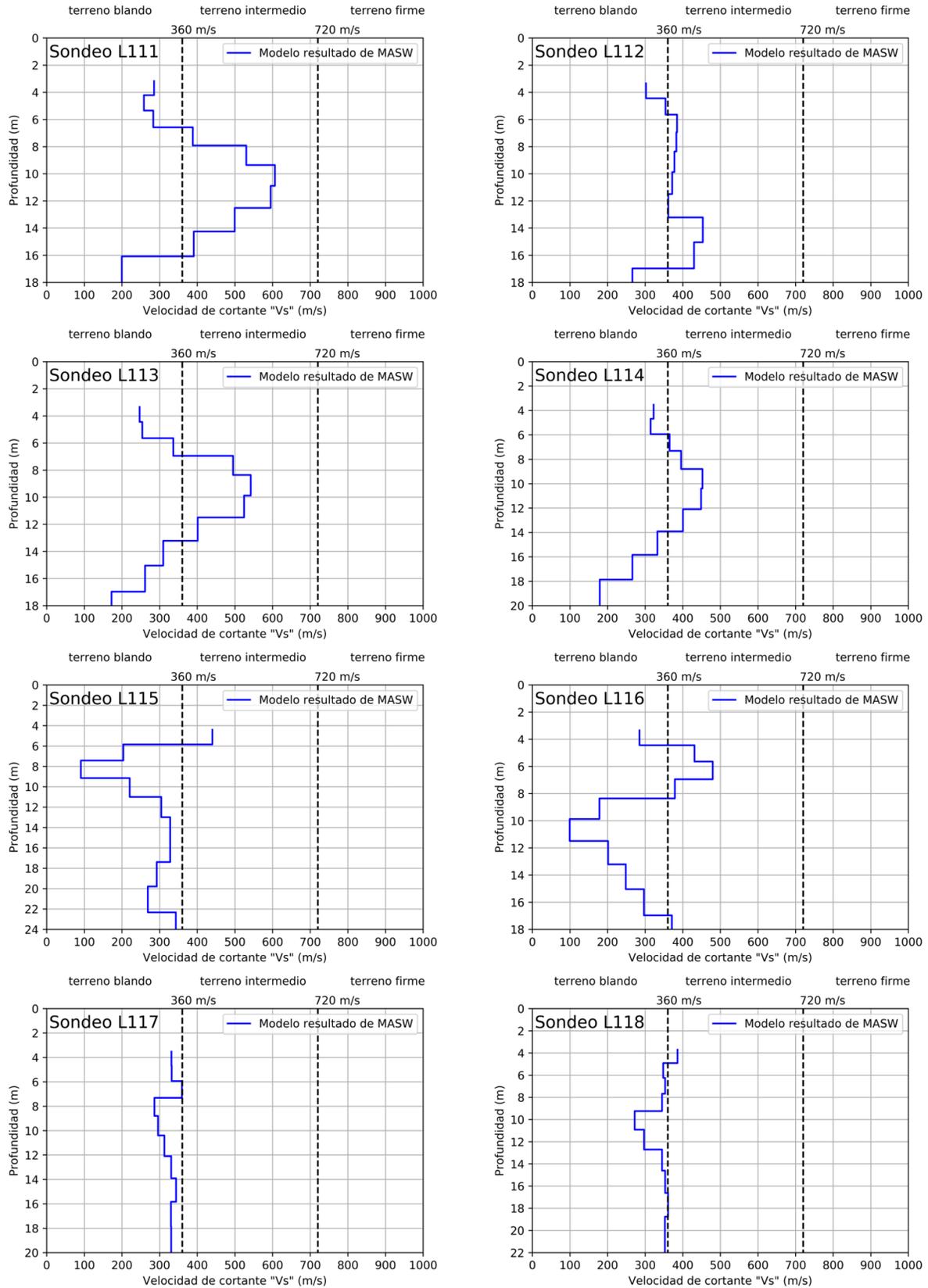


Figura 49 MASW ID 111 al 118 VdG.

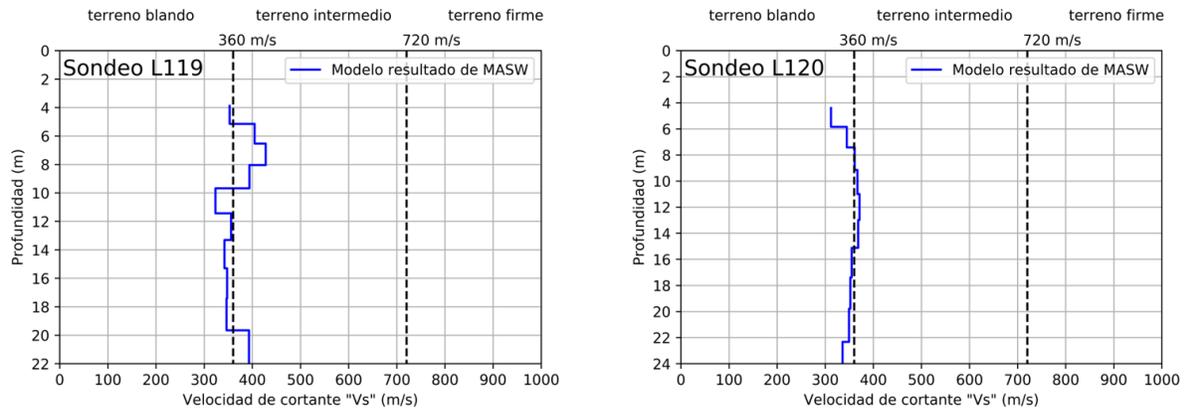


Figura 50 MASW 1D 119 y 120 VdG.

Con base en estos modelos se realizó una interpolación de los datos, con el fin de tener una visualización más general de toda la zona de estudio, en ella se incluyó la topografía con la que cuenta el terreno (Figura 51).

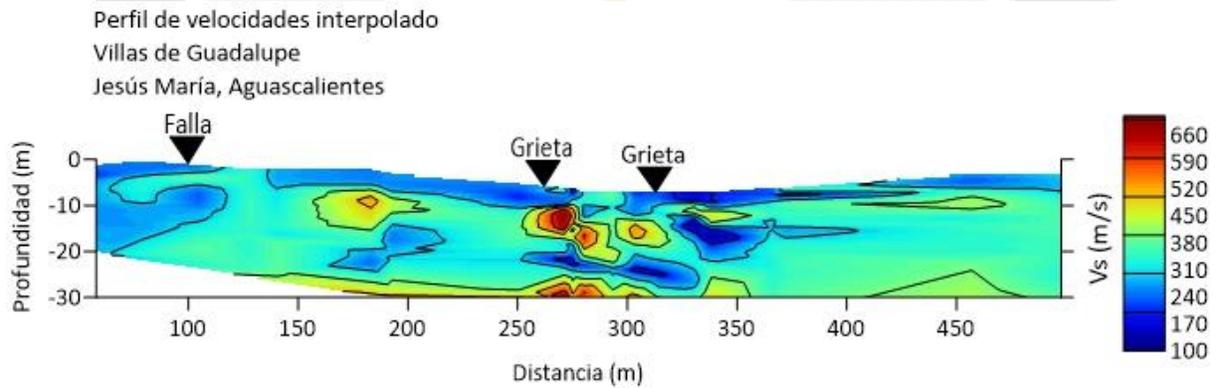
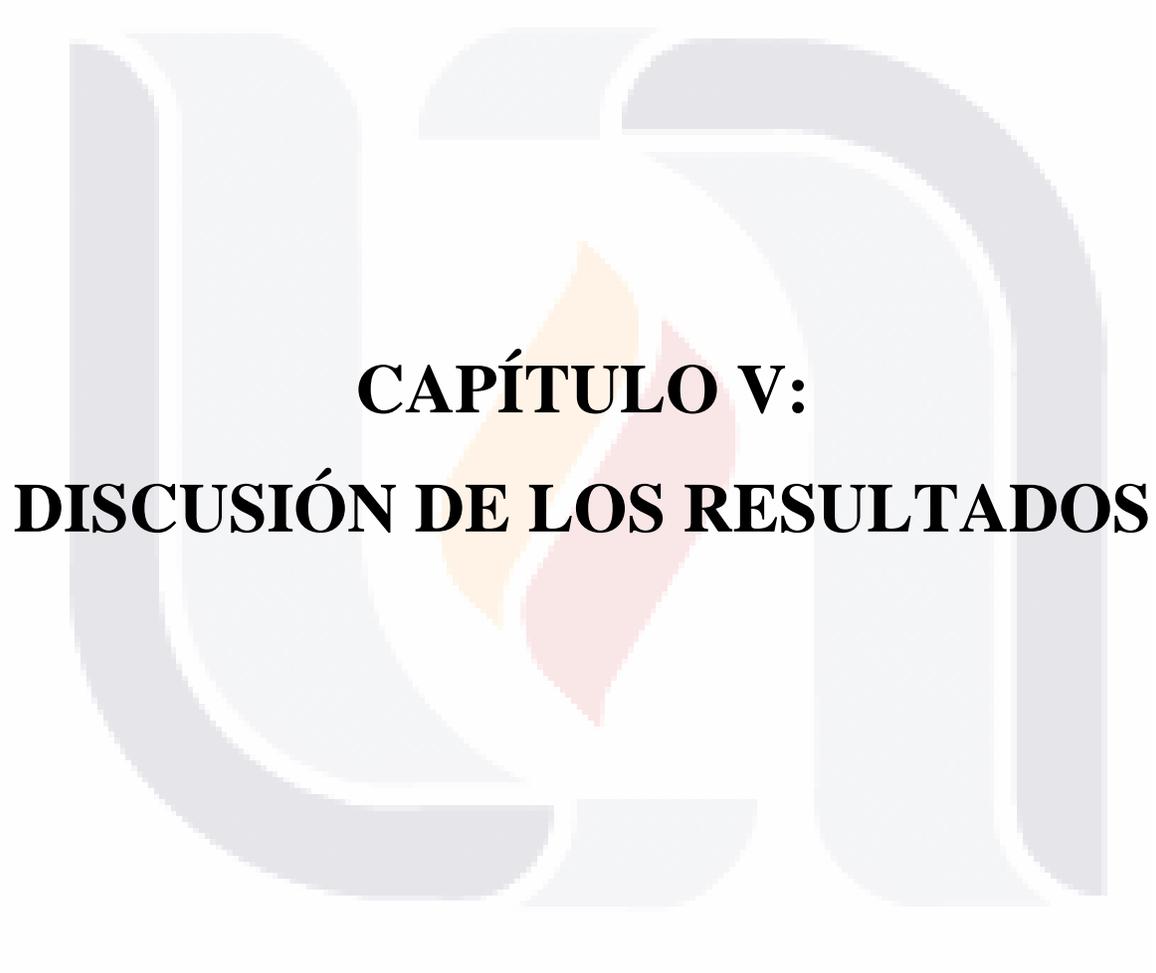


Figura 51 Interpolación MASWID VdG.

La Figura 52 muestra la estratigrafía que se tiene dentro del paleocauce, estas fotografías han sido tomadas de un lugar alrededor de 700 metros al sur de la zona estudiada, y se considera que es la continuidad de las grietas que se tienen en el lugar de estudio.



Figura 52 Estratigrafía del paleocauce.



**CAPÍTULO V:
DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los estudios de la propagación de ondas sísmicas en zonas de fallas reportados en la literatura se han realizado en sitios donde las fracturas son generadas por los límites de placas tectónicas o límites de fallas de mayor extensión. Se han reportado también simulaciones numéricas que permiten introducir discontinuidades pequeñas en el elemento de estudio, pero en la literatura científica no se ha reportado lo que pasa con la propagación de ondas en zonas de fracturas provocadas por el efecto de subsidencia.

La metodología empleada durante esta investigación se sustentó en el levantamiento de perfiles de resistividad eléctrica, los cuales permitieron ubicar las anomalías asociadas a las variaciones que presenta el subsuelo, tanto en su continuidad como en las propiedades eléctricas de los materiales que lo conforman, para después poder realizar determinaciones de la velocidad de la onda de cortante (V_s). Esto con el fin de conocer si dentro del área de afectación por la falla, existe alguna variación importante que modifique el peligro sísmico de la zona.

En la primera zona de estudio con el modelo de velocidades (Figura 33) se puede observar que existen unas franjas de baja velocidad de cortante que delimitan una zona en forma de trapecio invertido, los límites de esta zona anómala coinciden en el este con la falla “Vistas del Sol” y en el oeste con los daños que se observan en una pared de una vivienda. Comparando el modelo de velocidad de cortante (Figura 33) con el modelo de resistividad (Figura 28) se observa que la afectación a la pared se da justo en donde existe una gran variación en la resistividad del suelo como se muestra en la Figura 53.

El perímetro de este trapecio se interpreta como la zona de brecha de la falla (Vistas del Sol) en donde existen materiales disgregados, lo que genera la disminución en la velocidad de onda cortante. En el área conformada dentro de la zona de brecha se observa que las velocidades de onda son similares a las del exterior, lo que indica que las propiedades del suelo se mantienen dentro del bloque, mas no es así en la zona perimetral, generando, de esta manera, una pequeña área que sí puede ser afectada de una manera distinta en lo que respecta al peligro sísmico.

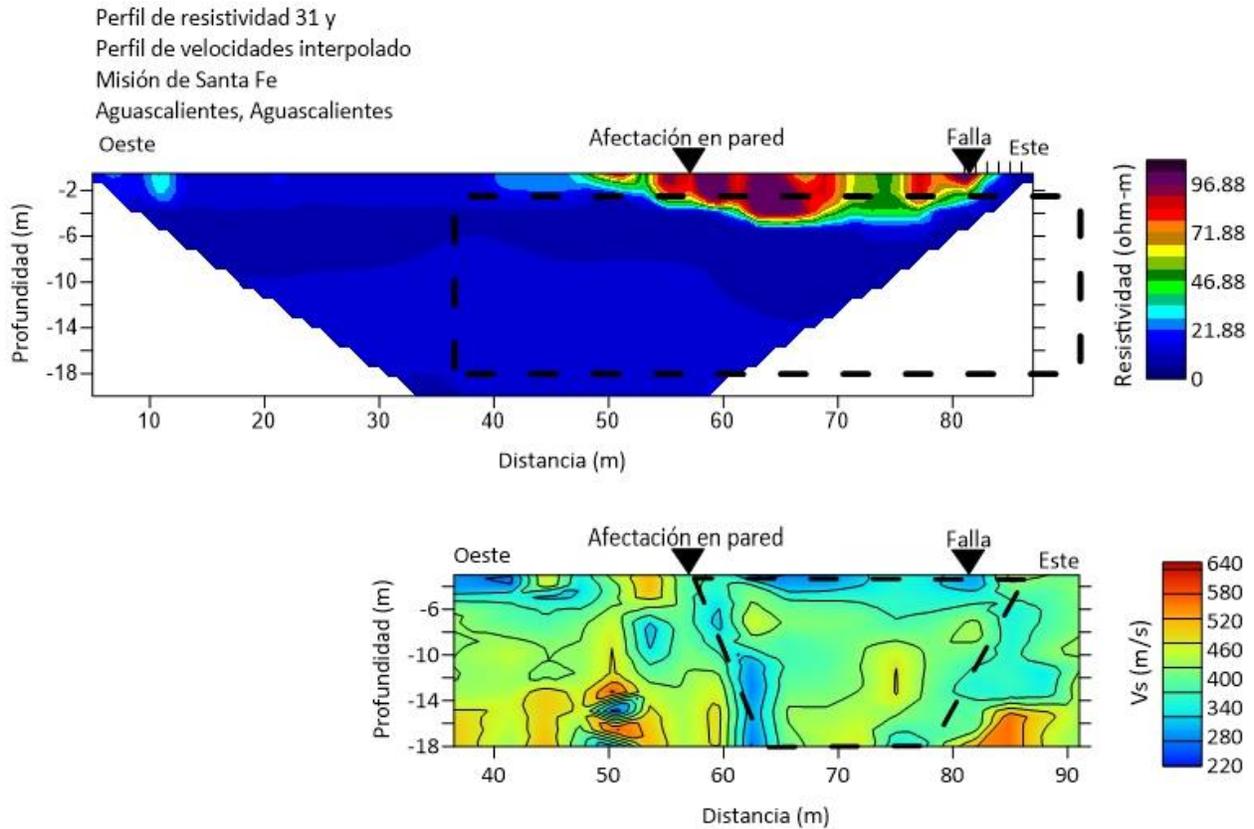


Figura 53 Comparación entre el perfil de resistividad #31 y el modelo interpolado de Vs primera zona de estudio).

Para la segunda zona de estudio, las anomalías en el modelo de velocidades de cortante se interpretaron como asociadas a la existencia de un paleocauce. Comparando los perfiles de resistividad 5 y 6 con el perfil de velocidades que se tiene (Figura 54), es posible observar que, las zonas con anomalías resistivas, coinciden con las anomalías en la velocidad de onda de cortante, principalmente en las zonas donde se encuentran ubicadas las 2 grietas, las cuales se interpretaron como los límites del paleocauce.

La existencia del paleocauce genera diversas anomalías en la velocidad de propagación de onda, debido a la intercalación de las capas estratigráficas (Figura 52), en donde es posible encontrar tanto material fino como material grueso y zonas con boleos mayores, estos últimos son los que generan la existencia de velocidades mayores.

En este perfil no se encuentran anomalías de velocidad en la zona de falla, ya que como se observa en la Figura 42, la fractura es generada por un elemento de mayor profundidad al cual no fue posible llegar por medio de la exploración sísmica

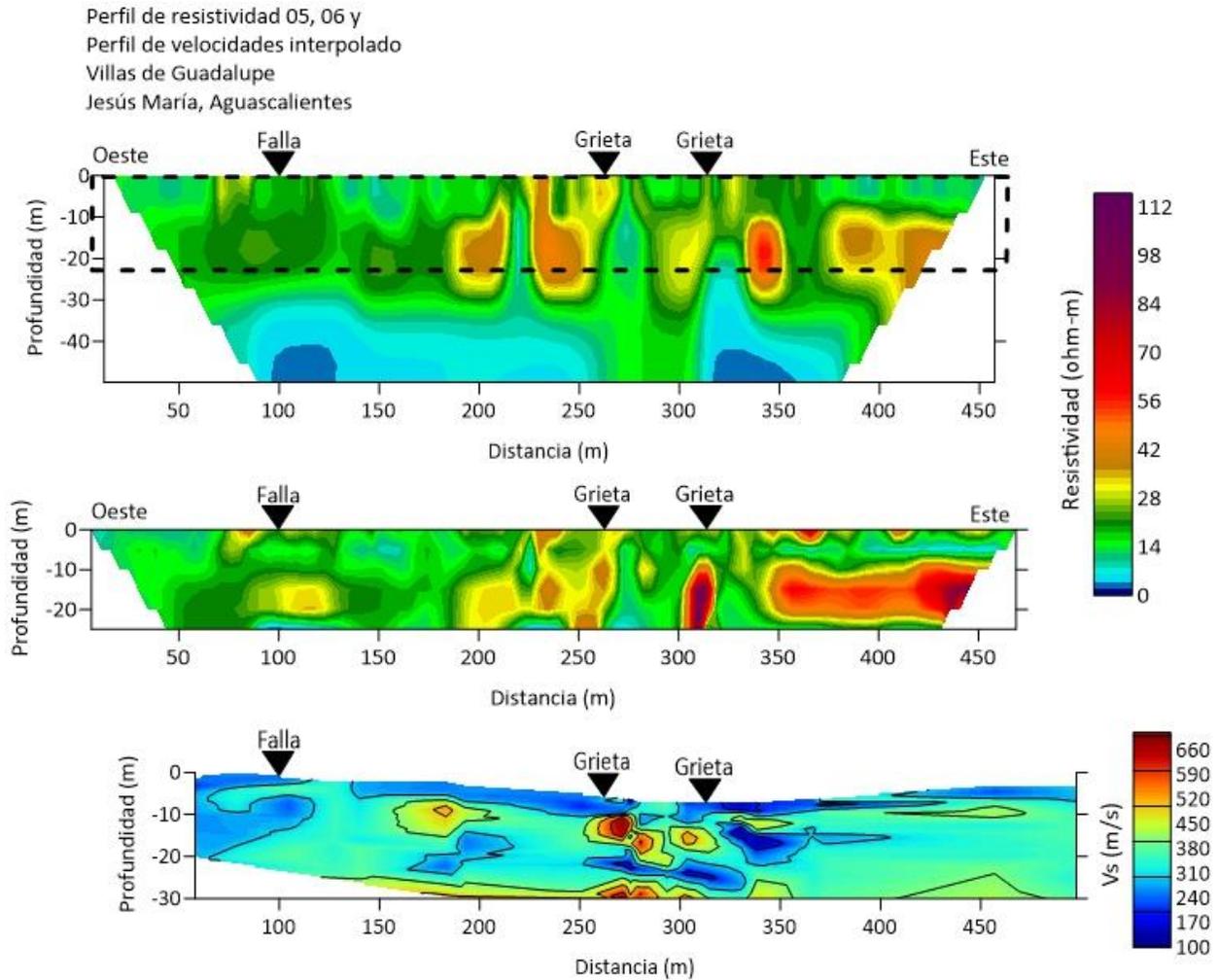


Figura 54 Comparación entre los perfiles de resistividad #5 y #6 y el modelo interpolado de Vs (segunda zona de estudio).

Contrastando ambas zonas estudiadas, los modelos de los perfiles medidos en Misión de Santa Fe muestran que en donde existen anomalías resistivas altas, se presentan velocidades bajas; mientras que, en la zona de Villas de Guadalupe, las anomalías resistivas altas corresponden con anomalías de velocidades altas. Esto es debido a la conformación de los estratos de cada zona, ya que en la zona de villas de Guadalupe las fracturas están asociadas a la presencia de un paleocauce, el cual cuenta con boleos y material más grueso, lo que genera el aumento en la velocidad de ondas; mientras que en la zona de Misión de Santa Fe el material presente es del mismo tipo, pero la falla y probablemente una fractura paralela han degradado las propiedades mecánicas del subsuelo lo que se refleja en una disminución de la velocidad de cortante que coincide con la traza de la falla y la fractura interpretada.



**CAPÍTULO VI:
CONCLUSIONES**

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

Conclusión general

El fracturamiento asociado a subsidencia no genera una modificación en la propagación de ondas sísmicas en las zonas aledañas a la falla, esta modificación solo se presenta de manera puntual en la zona donde se encuentra el fracturamiento, generando una disminución en la velocidad de onda cortante.

En las zonas con existencia de paleocauces la variación de la velocidad de onda depende de la estratigrafía que se tenga en la zona, debido a la existencia de varias capas de estratos con características muy diferentes cada una.

La existencia de fallas debidas a subsidencia no afecta en la propagación de ondas sísmicas, por lo tanto, no genera modificación en el efecto de sitio que se tiene actualmente en el lugar.

Conclusiones particulares

- El ancho de afectación que genera una fractura provocada por subsidencia depende de la estratigrafía que se tenga en el sitio, así como de la profundidad que esta tenga, ya que puede generar que un bloque completo se mueva, provocando un nuevo fracturamiento paralelo a la discontinuidad original.
- Es necesario realizar estudios, de resistividad eléctrica y sísmicos, para determinar el ancho de afectación que genera alguna falla, ya que a pesar de no presentarse visiblemente en la superficie este puede hacerlo en un futuro, afectando a la estructura que se encuentre sobre ella.
- La existencia de paleocauces genera variaciones, en las resistividades eléctricas y en las velocidades de onda, así como afectaciones en diversas partes de las zonas, provocando la aparición de grietas en la superficie y colapsos de partes del suelo.
- El efecto de sitio en las zonas de subsidencia, se ve modificado solo en los lugares puntuales donde se presenta la falla, generando una disminución en la velocidad de onda, pero sin afectar sus alrededores.

Nichos de investigación

Realizar la caracterización mecánica dinámica de diversos sitios de estudio, dentro del valle de Aguascalientes, con el fin de obtener una muestra de mayor confiabilidad.

Realizar estudios de sísmica en dirección perpendicular a la falla, con el fin de obtener la variación en la velocidad de onda antes y después de la afectación, aplicando las leyes de atenuación de onda (este estudio se tenía contemplado realizarlo, sin embargo, debido a la contingencia sanitaria por COVID-19 no fue posible concluirlo).

Mediante los estudios sísmicos perpendiculares a la falla, determinar si existe variación en el modo de vibrar de un lado y otro de la falla, esto mediante el análisis de las frecuencias que se perciben en cada geófono.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N., & Silva, W. (1997). Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 94-127.
- Alva Hurtado, J. E., & Escalaya, M. (2005). Actualización de los parámetros sismológicos en la evaluación del peligro sísmico en el Perú. *Simposio internacional en honor al profesor Yuji Ishiyama. 30 - 31 De Mayo*.
- Aranda-Gómez, J. J. (1989). Geología preliminar del Graben de Aguascalientes. *José Jorge Aranda-Gómez*, 8(1), 22-32.
- CFE. (2015). Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por sismo. Comentarios. México.
- Chávez, A. C., Arroyo, G. M., Zúñiga, R., Figuero, Á., Pérez, M. A., & López, C. S. (2012). Relación de atenuación del movimiento del suelo para la aceleración máxima (PGA) sobre el cinturón volcánico mexicano (MVB); análisis por trayectoria: Guerrero-Querétaro. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 67-93.
- Chávez-García, F., & Montalva, G. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*, 6-30.
- Chung, E. T., Efendiev, Y., Gibson Jr, R. L., & Vasilyeva, M. (2016). A generalized multiscale finite element method for elastic wave propagation in fractured media. *Int J Geomath*, 163-182.
- Cormier, V. F., & Spudich, P. (1984). Amplification of ground motion and waveform complexity in fault zones: examples from the San Andreas and Calaveras Faults. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 135-152.
- De_Basabe, J. D., Sen, M. K., & Wheeler, M. F. (2011). Seismic wave propagation in fractured media: A discontinuous Galerkin approach. *Annual Meeting* (págs. 2920-2924). San Antonio: SEG.
- Delgado, N. (2012). *Estimación de la atenuación de ondas sísmicas y su uso en la caracterización geofísica de un yacimiento*. (Tesis de maestría inédita), Universidad Nacional de Colombia.
- Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). *Land subsidence in the United States*. United States: U.S. Geological Survey. doi:10.3133/cir1182
- García, A., Pozos, A., Hong, H., & Gómez, R. (2012). Estimación del peligro sísmico debido a sismos interplaca e in slab y sus implicaciones en el diseño sísmico. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 27-54.

- García, D., Singh, S. K., Herraíz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab earthquakes of Central Mexico: peak ground-motion parameters and response spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2272–2282.
- Giner Caturla, J. J., & Molina Palacios, S. (2001). *Sismicidad y riesgo sísmico en la CAV*. Editorial Club Universitario.
- Gómez Capera, A. A., & Salcedo Hurtado, E. d. (2002). Leyes de atenuación de la intensidad macrosísmica en Colombia. *Geofísica Colombiana*, 53-61.
- Hernández-Marín, M., & Pacheco-Martínez, J. (2011). Análisis numérico del fracturamiento superficial en la población de Jesús María, Aguascalientes., (págs. 202-215). Aguascalientes, México.
- Herráiz Sarachaga, M. (1997). *Conceptos Básicos de Sismología para ingenieros*. Lima, Perú.
- Herrera, I. (2012). *Análisis de la susceptibilidad a la subsidencia en el estado de San Luis Potosí (México) como herramienta de la gestión ambiental*. (Tesis de maestría inédita), Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Igel, H., Ben-Zion, Y., & Leary, P. C. (1997). Simulation of SH- and P-S V-wave propagation in fault zones. *Geophys. J. Int.*, 533-546.
- Keller, E. A., & Blodgett, R. H. (2004). *Riesgos Naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Moncayo Theurer, M., Velasco, G., Rodríguez, J., & Terán. (2017). Análisis comparativo entre 13 leyes de atenuación y los registros de un sismo de grado 7.1 en magnitud Richter ocurrido en Japón. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 137-146.
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. In *Física de la Tierra* (pp. 199-215). Madrid: Universidad Complutense.
- Ordaz, M., Jara, J., & Singh, S. (1989). *Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero*. Informe conjunto del II-UNAM y el Centro de Investigación Sísmica AC de la Fundación Javier Barros Sierra al Gobierno del estado de Guerrero, Instituto de Ingeniería, UNAM, proyectos 8782 y 9745, México.
- Pacheco-Martínez, J., Cabral-Cano, E., Wdowinski, S., Hernández-Marín, M., Ortiz-Lozano, J. Á., & Zermeño-de-León, M. E. (2015). Application of InSAR and Gravimetry for Land Subsidence Hazard Zoning in Aguascalientes, Mexico. *Remote Sensing*, 17035-17050.

- Pacheco-Martínez, J., Zermeño-De-León, M. E., Ortiz-Lozano, J. Á., Solís-Pinto, A., Romero-Navarro, M. A., Aguilar-Valdez, F., & López-Fuentes, J. A. (2011). Soil Cracks related to land subsidence. The main geotechnical hazard affecting to constructions in Aguascalientes City, México. *Proceedings of the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Toronto, Ontario, Canadá.
- Spudich, P., & Olsen, K. B. (2001). Fault zone amplified waves as a possible seismic hazard along the Calaveras fault in central California. *Geophysical Research Letters*, 2533-2536.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsistencia del Terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 295-302.
- Tsige, M., & Garcia Flórez, I. (2006). Propuesta de clasificación geotécnica del “Efecto Sitio” (Amplificación Sísmica) de las formaciones geológicas de la Región de Murcia. *GEOGACETA*, 39-42.
- Udías, A. (2000). *Principles of Seismology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN.
- Zermeño-De-Leon, M., Pacheco-Martínez, J., Mendoza-Otero, E., Arzate-Flores, J., & Arroyo-Contreras, M. (2006). Fracturamientos y fallas de suelos, experiencias en la cd. de Aguascalientes, Ags. y Santiago de Querétaro, Qro. *XXIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, (pp. 793-801). Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
- Zhang, J., & Gao, H. (2009). Elastic wave modelling in 3-D fractured media: an explicit approach. *Geophys. J. Int.* , 1233–1241.