



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

**Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción**

**Departamento de Geotecnia e Hidráulica**

**Tesis**

ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD DE FRACTURAMIENTO Y FALLAMIENTO DEL  
TERRENO DEBIDO A SUBSIDENCIA Y REACTIVACIÓN DE PALEOCAUCES EN EL  
MUNICIPIO DE JESÚS MARÍA, AGUASCALIENTES.

**Presenta**

Ing. Hugo Luna Villavicencio

Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil con opción  
ambiental

**Tutor**

Dr. Jesús Pacheco Martínez

**Cotutor**

Dr. Martín Hernández Marín

**Comité Tutorial**

M. en C. William Herbe Herrera León

Aguascalientes, Ags, 21 de septiembre del 2018

## AUTORIZACIONES



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES

FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS  
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

### PRESENTE


Por medio del presente como Tutor designado del estudiante HUGO LUNA VILLAVICENCIO con ID 225727 quien realizó la tesis titulada: ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD DE FRACTURAMIENTO Y FALLAMIENTO DEL TERRENO DEBIDO A SUBSIDENCIA Y REACTIVACIÓN DE PALEOCAUCES EN EL MUNICIPIO DE JESÚS MARÍA, AGUASCALIENTES, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el VOTO APROBATORIO, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.


Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.


ATE NTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags, a 20 de septiembre de 2018.

  
Dr. Jesús Pacheco Martínez  
Tutor de tesis

  
Dr. Martín Hernández Marín  
Cotutor de tesis

  
M. William Herbe Herrera León  
Asesor



c.p.- Interesado  
c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado  
c.p.- Jefatura del Depto. de Ciencias del diseño y de la construcción  
c.p.- Consejo Académico  
c.p.- Minuta Secretario Técnico



Oficio: CCDC-D-378-2018  
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna  
Dirección General de Investigación y Posgrado  
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "ESTUDIO DE SUSCEPTIBILIDAD DE FRACTURAMIENTO Y FALLAMIENTO DEL TERRENO DEBIDO A SUBSIDENCIA Y REACTIVACIÓN DE PALEÓCAUCES EN EL MUNICIPIO DE JESÚS MARÍA, AGUASCALIENTES". Presentado por el sustentante: Hugo Luna Villavicencio con ID: 225727, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto **aprobatario** correspondiente.

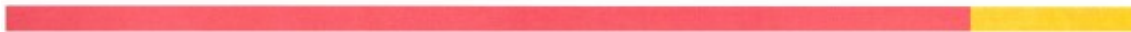
Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE  
Aguascalientes, Ags., 20 de septiembre de 2018  
"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria  
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

- c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Solo Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez– Tutor de tesis.
- c.c.p.- Ing. Hugo Luna Villavicencio – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p.- Archivo

OVG/trv



## AGRADECIMIENTOS

---

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

A mi tutor el Dr. Pacheco, gracias por los consejos y apoyo; por ser más que un tutor, un buen amigo, siempre recordaré la buena disposición para trabajar y la manera amable que me atendió, muchas gracias Doctor.

A mi comité tutorial y sinodal por dedicarle tiempo a revisar mi tesis y realizar observación que enriquecieron mi investigación. Muchas gracias Dr. Martín, Maestra Norma y Maestro William.

A mis amigos que ayudaron con la recolección de datos, principalmente al “Fercho” por su buena disposición; iguáleme a Kevin y Rufino, alumnos que realizaron verano de investigación de la UAS y de UAGro, gracias.

A mis amigos de la UAZ y del Remolino por siempre apoyarme y hacer amenos los fines de semana de largas pláticas y mucha risa, gracias.

## DEDICATORIAS

---

A mi familia, a mis padres y hermana por su apoyo incondicional; a mi mamá Juanita, por preocuparse que siempre estuviera bien y no me faltara nada; a mi papá Miguel, por sus consejos y por siempre preocuparse en convertirme en una persona responsable; mi hermana Erika, por sus palabras de aliento en los momentos más difíciles. Gracias a todos, al fin lo he logrado.



**ÍNDICE GENERAL**

---

<b>1</b>	<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b>16</b>
1.1	<b>Prólogo</b> .....	<b>16</b>
1.2	<b>Objetivo General</b> .....	<b>17</b>
1.3	<b>Objetivos Particulares</b> .....	<b>17</b>
1.4	<b>Alcances</b> .....	<b>18</b>
1.5	<b>Justificación</b> .....	<b>18</b>
1.6	<b>Hipótesis</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b><i>MARCO TEÓRICO</i></b> .....	<b>20</b>
2.1	<b>Métodos Geofísicos</b> .....	<b>20</b>
2.2	<b>Métodos eléctricos</b> .....	<b>20</b>
2.2.1	Resistividad eléctrica .....	21
2.3	<b>Métodos sísmicos</b> .....	<b>23</b>
2.3.1	Refracción sísmica.....	24
2.3.2	MASW (Multiple-Channel Analysis of Surface Waves) .....	27
<b>3</b>	<b><i>ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO</i></b> .....	<b>30</b>
3.1	<b>Mecanismos de fracturamiento</b> .....	<b>30</b>
3.2	<b>Estudios geofísicos y geológicos</b> .....	<b>35</b>
<b>4</b>	<b><i>METODOLOGÍA</i></b> .....	<b>37</b>
<b>5</b>	<b><i>RESULTADOS</i></b> .....	<b>42</b>
5.1	<b>Región uno</b> .....	<b>42</b>
5.1.1	Lugar de medición número 1. Carretera N° 66 .....	42
5.1.2	Lugar de medición número 2. Carretera N° 66-2.....	46

5.1.3	Lugar de medición número 3. Frente a “Q campestre” .....	50
<b>5.2</b>	<b>Región dos.....</b>	<b>55</b>
5.2.1	Lugar de medición número 4. Atrás de “Q campestre” .....	55
5.2.2	Lugar de medición número 5. Avenida Guadalupe González.....	60
5.2.3	Lugar de medición número 6. Avenida Guadalupe González - 2 .....	65
5.2.4	Lugar de medición número 7. Av. Gpe. González – 3 .....	69
5.2.5	Lugar de medición número 8. Las Liebres.....	71
<b>5.3</b>	<b>Región tres .....</b>	<b>73</b>
5.3.1	Lugar de medición número 9. La Posta – UAA.....	73
<b>5.4</b>	<b>Región cuatro .....</b>	<b>77</b>
5.4.1	Lugar de medición número 10. Pensión de Jesús María .....	77
<b>5.5</b>	<b>Región cinco.....</b>	<b>80</b>
5.5.1	Lugar de medición número 11. 3er anillo y avenida constitución .....	80
<b>5.6</b>	<b>Caracterización de materiales .....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b><i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>.....</b>	<b>86</b>
6.1	Perfiles de tomografía eléctrica .....	86
6.2	Perfiles de refracción sísmica.....	93
6.3	Perfiles de MASW 1D.....	97
6.4	Caracterización de materiales .....	97
<b>7</b>	<b><i>CONCLUSIONES</i>.....</b>	<b>99</b>
7.1	Conclusión general.....	99
7.2	Conclusiones particulares .....	101
7.3	Nichos de Investigación .....	101
<b>8</b>	<b><i>REFERENCIAS</i> .....</b>	<b>102</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1 Rango usual de velocidades de Onda P, para los materiales geológicos. Tomado de IMT (2003). .....24

Tabla 2.2 Velocidades promedio de onda S por la NEHRP para diferentes tipos de materiales para una profundidad de 30 metros, medidos desde la superficie. Tomada de Schmidt, (2010).  
.....24





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Configuración general para resistividad eléctrica. Tomado de Groves et al., (2011). .....	21
Figura 2.2 Rangos típicos para resistividad y conductividad en suelos y rocas. Modificado de Lowrie, (2007). ....	23
Figura 2.3 Caso general para dos capas con el método de refracción sísmica. Al viajar la onda sísmica del estrato uno al dos su velocidad aumenta, esto ocasiona que la pendiente disminuya, este cambio de pendiente indica la existencia de otro estrato subsecuente. La línea azul muestra como viajan las ondas a través del medio, la estrella roja representa la fuente sísmica y origen de las ondas sísmica. Modificada de Groves et al, (2011). ....	27
Figura 2.4 Modelo de ondas superficiales (a) profundidad de penetración de ondas superficiales (b) modos de ondas superficiales. Tomada de Groves et al, (2011).....	28
Figura 3.1 Protuberancia en el lecho rocoso. a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson, y Pewe (1986).....	31
Figura 3.2 Discontinuidad relacionada con el nivel del agua subterránea a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson y Pewe (1986). ....	32
Figura 3.3 Fuertes pendientes en el lecho roso a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson (1987). ....	32
Figura 3.4 Pendientes bajas en el lecho rocoso a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson (1987). ....	32
Figura 3.5 Variación vertical en los estratos a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson (1987). ....	33
Figura 3.6 Falla antiguas sepultadas. a) Antes del bombeo, ya existen estratos desplazados verticalmente antes del proceso de subsidencia b) Después del bombeo. Modificada de Slaff (1993).....	33
Figura 3.7 Fractura por reactivación de paleocauces a) Antes del flujo subterráneo b) Después de flujo. Modificada de Pacheco-Martínez et al. (2013). ....	34
Figura 3.8 Modelos conceptuales de fracturamientos en presencia de fallas, la flechas en color negro indican la dirección del agua a) Modelo de viga flexionada b) Modelo de Helm c)	

Modelo de desplazamiento discontinuo horizontal. La potencial rotación indicada en los incisos a) y b) está referida al plano de falla. Q hace referencia a un pozo de bombeo Tomada de Hernández-Marín y Burbey (2010).....35

Figura 4.1 Ubicación de zona de proyecto de investigación y lugares donde se realizaron las mediciones. Los números adyacentes a los lugares de estudio representan los sitios de las mediciones, los rectángulos de color magenta representan las regiones estudiadas. ....38

Figura 4.2 Arreglo de geófonos para el método de refracción sísmica y MASW 1D. Las estrellas en diferentes colores corresponden a los sitios donde fueron realizadas las mediciones de MASW 1D, color rojo para la medición izquierda y azul para medición derecha. ....39

Figura 4.3 Trazo de domocrona y cálculo de valores de velocidad a) Arreglo típico para una domocrona b) Grafica de velocidades entre los geófonos (negro), velocidades promedio(roja) y ajuste de curva( azul). ....40

Figura 5.1 Sitio de estudio 1. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.2. ....42

Figura 5.2 Imágenes del sitio 1, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.1. 1) Muestra la falla junto a una excavación en donde es posible observar la discontinuidad dentro de ella. 2) Muestra escarpe creado en la carretera. ....43

Figura 5.3 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 1. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.1. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 1 (Figura 5.4). ....44

Figura 5.4 Perfil de refracción sísmica del sitio 1. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.1. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....44

Figura 5.5 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.....45

Figura 5.6 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 1. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).....46

Figura 5.7 Sitio de estudio 2. . a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.8. ....47

Figura 5.8 Imágenes del sitio 2, la ubicación de las imágenes se observa en la Figura 5.7. 1) Escarpe de 0.90 metros con un buzamiento hacia el oriente. 2) Daños en las construcciones cercanas a la falla. ....47

Figura 5.9 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 2. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.7. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 2 (Figura 5.10). ....48

Figura 5.10 Perfil de refracción sísmica del sitio 2. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.7. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe en la superficie.....49

Figura 5.11 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.....49

Figura 5.12 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 2 a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).....50

Figura 5.13 Sitio de estudio 3. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.14. ....51

Figura 5.14 Imágenes del sitio 3, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.13. 1) Muestra una grieta en el suelo 2) daños en la infraestructura 3) Estratos rellenos con caliche. ....52

Figura 5.15 Perfil de tomografía eléctrica resistiva sitio 3. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.13 La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 3 (Figura 5.16). .....53

Figura 5.16 Perfil de refracción sísmica, sitio 3. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.13. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe en la superficie. ....53

Figura 5.17 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos, para el sitio tres. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades. ....54

Figura 5.18 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 3. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2). ....55

Figura 5.19 Sitio de estudio 4. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de la imagen mostrada en la Figura 5.20.....56

Figura 5.20 Imagen del sitio 4, la ubicación de la imagen se muestra en la Figura 5.19. 1) el lugar en donde no existe una discontinuidad el terreno muestra un escarpe, pero indica que fue realizado con intenciones agrícolas, vista al sur. ....56

Figura 5.21 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 4 La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.13. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 4 (Figura 5.22). .....57

Figura 5.22 Perfil de refracción sísmica del sitio 4. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.19. La línea punteada superior representa la superficie del terreno. 58

Figura 5.23 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos del sitio 4. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.....59

Figura 5.24 Pruebas de MASW 1D, sitio 4 velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 4. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2). .....60

Figura 5.25 Sitio de estudio 5. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.26. ....61

Figura 5.26 Imágenes del sitio 5, la ubicación de las imágenes se observa en la Figura 5.25. 1) Escarpe de 0.15 metros con un buzamiento hacia el poniente. 2) Escarpe de 0.15 metros con un buzamiento hacia el poniente. Las líneas rojas paralelas representan la dirección del bloque hundido. ....61

Figura 5.27 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 5. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.26. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 5 (Figura 5.28). .....62

Figura 5.28 Perfil de refracción sísmica del sitio 5. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.25. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....63

Figura 5.29 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos del sitio 5. a) Domocronas b) Procesamiento de las velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.....64

Figura 5.30 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 5 a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C.

Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2). .....65

Figura 5.31 Sitio de estudio 6. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.32. ....66

Figura 5.32 Imágenes del sitio 6, las líneas rojas paralelas muestran el buzamiento de la falla y un escarpe de 0.15 metros, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.31. 1) Vista hacia el norte. 2) Vista hacia el poniente.....66

Figura 5.33 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 6. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.32. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 6 (Figura 5.34). .....67

Figura 5.34 Perfil de refracción sísmica del sitio 6. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.31. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....67

Figura 5.35 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.....68

Figura 5.36 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 6. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2). .....69

Figura 5.37 Sitio de estudio 7. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica..... 70

Figura 5.38 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 7 La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.37. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....71

Figura 5.39 Sitio de estudio 8. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica.....72

Figura 5.40 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 7 La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.39.....73

Figura 5.41 Sitio de estudio 9, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.42. a) Macrolocalización. Se muestran la región tres b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica.....74

Figura 5.42 Imágenes del sitio 9, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.41. 1) Traza de la falla en la línea A 2) Traza de la falla en la línea B 3) Traza de la falla en la línea C.....74

Figura 5.43 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 9 – A. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.42, La línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....75

Figura 5.44 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 9 – B. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.42, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....76

Figura 5.45 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 9 – C. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.42, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....76

Figura 5.46 Sitio de estudio 10. a) Macrolocalización. Se muestran la región cuatro b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.47. .77

Figura 5.47 Imagen del sitio 10, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.46 1) Muestra la falla. ....78

Figura 5.48 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, sitio 10-A. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.46, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....79

Figura 5.49 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, sitio 10-B. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.46, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....79

Figura 5.50 Lugar de estudios 11. a) Macrolocalización. Se muestran la región cinco b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.51. .80

Figura 5.51 Imagen del sitio 11, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.46 1) Muestra la falla, superior vista hacia el poniente e inferior vista al oriente. ....81

Figura 5.52 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, sitio 11. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.50, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe. ....82

Figura 5.53 Columnas estratigráficas obtenidas en la trinchera. El lugar de muestro se muestra a) Columna A b) Columna C, c) Columna B. ....83

Figura 5.54 Gráfica de resistividad - Humedad para diferentes materiales en el valle de Aguascalientes. Mat en color azul, Mat 2 en color verde, Mat 3 en color negro, Mat 4 en color magenta, Mat 5 en color cian y Mat 6 en color rojo.....85

Figura 5.55 Perfil de tomografía eléctrica, en el sitio de la caracterización, la ubicación se muestra en la Figura 4.1. La línea negra representan las fracturas encontradas en la trinchera, los rectángulos azules indican la ubicación delos perfiles mostrados en la Figura 5.53. ....85

Figura 6.1 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 1, Las H's representan el espesor del estrato. a) Interpretación del TER 1, b) Interpretación del TER 2 c) Interpretación del TER 3. ....87

Figura 6.2 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 2. a) Interpretación del TER 4 b) Interpretación del TER 5 c) Interpretación del TER 6 d) Interpretación del TER 7 e) Interpretación del TER 8. ....89

Figura 6.3 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 3 a) Interpretación del TER 9–A b) Interpretación del TER 9-B c) Interpretación del TER 9-C.....91

Figura 6.4 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 3. a) Interpretación del TER 10-A b) Interpretación del TER 10-B.....92

Figura 6.5 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 2, TER 11. ....93

Figura 6.6 Viaje de ondas sísmicas a través de la zona activa de la falla y la zona sin falla, la estrella roja representa el origen de las ondas sísmicas. En ella se muestra dos zonas sin falla donde la velocidad (V1) es mayor a la velocidad en la zona activa V2. ....94

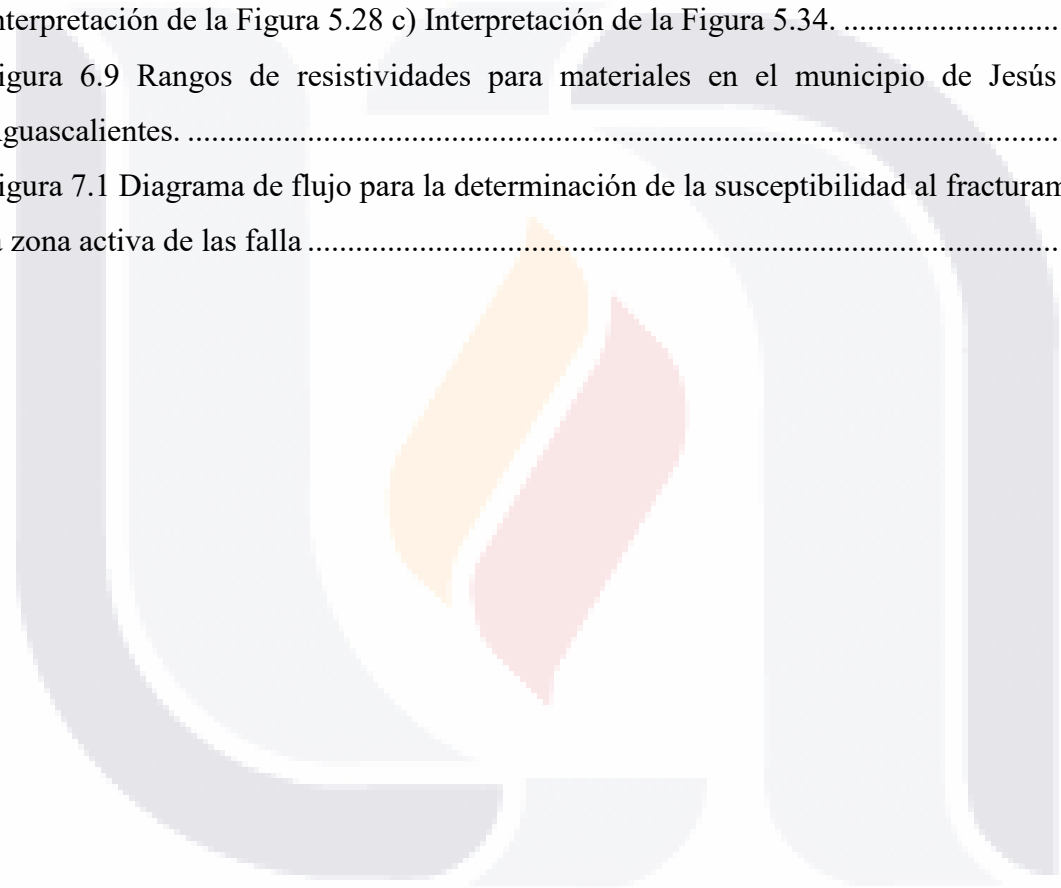


Figura 6.7 Interpretación de perfiles de refracción sísmica en la región uno; el color rojo representa la zona donde la falla está activa, el Color naranja representa la zona de transición y el color verde representa la zona sin falla. a) Interpretación de la Figura 5.4 b) Interpretación de la Figura 5.10 c) Interpretación de la Figura 5.16. ....95

Figura 6.8 Interpretación de perfiles de refracción sísmica en la región dos; el color rojo representa la zona donde la falla está activa, el Color naranja representa la zona de transición y el color verde representa la zona sin falla. a) Interpretación de la Figura 5.22 b) Interpretación de la Figura 5.28 c) Interpretación de la Figura 5.34. ....96

Figura 6.9 Rangos de resistividades para materiales en el municipio de Jesús María, Aguascalientes. ....98

Figura 7.1 Diagrama de flujo para la determinación de la susceptibilidad al fracturamiento y la zona activa de las falla ..... 100



## ACRÓNIMOS

---

GPR: Radar de penetración terrestre

IMT: Instituto Mexicano del Transporte

MASW: Multiple-Channel Analysis of Surface Waves

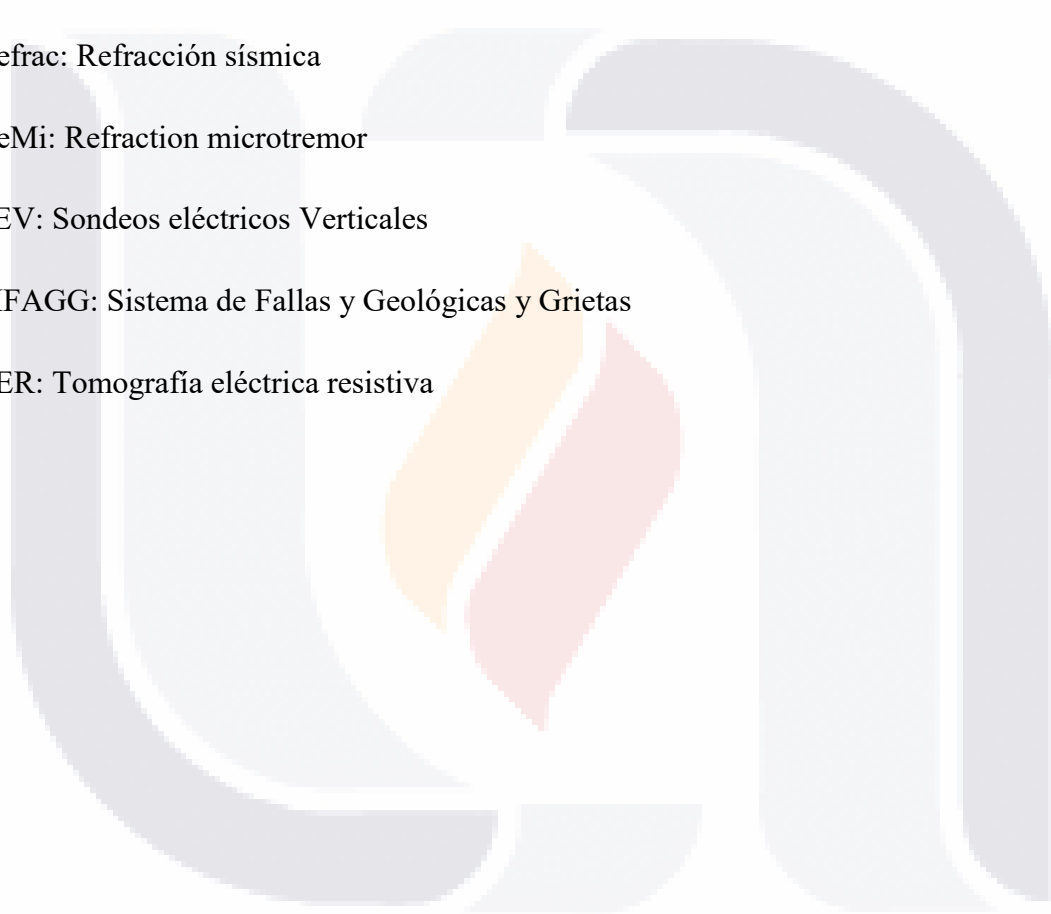
Refrac: Refracción sísmica

ReMi: Refraction microtremor

SEV: Sondeos eléctricos Verticales

SIFAGG: Sistema de Fallas y Geológicas y Grietas

TER: Tomografía eléctrica resistiva



## RESUMEN

---

El valle aluvial y fluvial donde se encuentra la ciudad de Aguascalientes ha desarrollado en los últimos años un gran crecimiento industrial y poblacional, lo que ha provocado la sobre explotación de los mantos acuíferos en la zona. Dicha extracción ha generado un descenso del nivel de la superficie por el reacomodo de las partículas sólidas al extraer el agua, este fenómeno es conocido como subsidencia. Con el proceso de subsidencia se han creado discontinuidades (fallas y fracturas) por asentamientos diferenciales que dañan las construcciones, vialidades e instalaciones. La aparición de estas fracturas está asociada a tres tipos de orígenes: geológico, reactivación por la subsidencia y reactivación de paleocauces. Por tal motivo es necesario implementar una metodología para la determinación de zonas susceptibles presentar discontinuidades y la determinación del ancho de influencia de las fallas activas.

Se realizaron pruebas geofísicas para la caracterización de las discontinuidades de la zona de Jesús María, Aguascalientes. Se utilizaron métodos eléctricos y sísmicos, específicamente se aplicaron perfil de resistividad eléctrica, refracción sísmica y MASW 1D.

Los perfiles de tomografía eléctrica mostraron que la configuración estratigráfica, podría facilitar el desarrollo de diferentes tipos de discontinuidades. Los perfiles de refracción sísmica muestran zonas de baja velocidad de ondas sísmicas en los lugares donde se encuentran las fallas.

Los perfiles de tomografía eléctrica mostraron buenos resultados para la determinación de la configuración estratigráfica. Esta configuración se fue analizada para buscar condiciones que faciliten la generación de discontinuidades. Los perfiles de refracción sísmica mostraron con gran detalle las zonas donde la falla se encuentra activa o zonas de influencia de la falla. Usando ambas técnicas fue propuesta una metodología para determinar zonas susceptibles a fracturamiento y fallamiento y para delimitar el ancho de influencia de las fallas.

## ABSTRACT

---

The alluvial and fluvial valley where the city of Aguascalientes is located has developed a great industrial and population growth in recent years, which has caused the over exploitation of the aquifers in the area. This extraction has generated a decrease in the level of the surface by the rearrangement of the solid particles when extracting the water, this phenomenon is known as land subsidence. With the process of land subsidence, discontinuities (faults and fractures) by differential settlements have been created, damaging buildings, roads and facilities. The appearance of these structures is associated to three types of origins: geological, reactivation by land subsidence and reactivation of paleo-channels. For this reason, it is necessary to implement a methodology for the determination of susceptible zones to present discontinuities and the determination of the width of influence of the active faults.

Geophysical tests were carried out to characterize the discontinuities in the area of Jesús María, Aguascalientes. Electrical and seismic methods were used, specifically electric resistivity, seismic refraction and MASW 1D profiles were applied.

The electrical tomography profiles showed that the stratigraphic configuration could facilitate the development of different types of discontinuities. The seismic refraction profiles show areas of low-speed seismic waves in the places where the faults are located.

The electrical tomography profiles showed good results for the determination of the stratigraphic configuration. This configuration was analyzed to find conditions that facilitate the generation of discontinuities. The profiles of seismic refraction showed in good detail the zones where the fault is active or zones of influence of the fault. Using both techniques, a methodology was proposed to determine zones susceptible to fracturing and faulting and to delimit the width of influence of the faults.

## 1 INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 Prólogo

El fenómeno de subsidencia es el desplazamiento vertical de la superficie del terreno, este fenómeno puede estar asociado a la sobre explotación de agua subterránea y se ha presentado en varios países como: China, Italia, Estados Unidos, India, Indonesia, España, Japón y México (Hu et al., 2009; Galloway y Burbey, 2011). En México han sido registradas varias ciudades donde se ha presentado este problema, por ejemplo: Querétaro, Salamanca, Celaya, Irapuato, Tepic, Ciudad de México y Aguascalientes (Chaussard et al. 2014).

La subsidencia se puede presentar por dos factores, siendo estos la actividad humana y actividad geológica (Huang, Shu, Yang, 2012) y se presenta generalmente con las siguientes características: progresiva, irreversible, regional, y con desplazamiento diferencial.

En las últimas décadas, el problema de subsidencia ha llamado la atención en el valle de Aguascalientes, mismo que está formado por materiales lacustres y aluviales, lo que lo convierte en un valle heterogéneo (Pacheco-Martínez et al. 2013). Este valle está limitado por dos grandes fallas antiguas, las denominadas Falla oriente y Falla poniente. Además, con el transcurso del tiempo se han generado nuevas fallas, las cuales están vinculadas al efecto de subsidencia y reactivación de paleocauces (Pacheco-Martínez et al. 2013). Los paleocauces se definen como antiguos canales superficiales de agua que fueron sepultados durante la formación del valle. Estas estructuras sedimentarias están formadas en su mayoría por arenas y gravas, y tienen una porosidad efectiva mayor que el material que los ha sepultado, lo que facilita el flujo de agua subsuperficial a través de ellos. Cuando el agua fluye por estos paleocauces se genera un arrastre de partículas finas, que con el paso del tiempo se produce una fractura de manera súbita, a esto se le definirá como reactivación de paleocauce en este trabajo en particular. Los municipios de Jesús María y Aguascalientes, por el gran número de discontinuidades que presentan, son un buen ejemplo para caracterizar las fallas y conocer los factores que originan dichas discontinuidades, las cuales, se pueden clasificar en dos grandes tipos: fallas y fracturas. Las fallas, son aquellas donde existe desplazamiento vertical y horizontal. Las fracturas, solamente representan discontinuidad de forma horizontal (Galloway y Burbey 2011).

En el valle de Aguascalientes, las discontinuidades se han cartografiado se pueden consultar geoespacialmente en el SIFAGG (Sistema de Fallas Geológicas y Grietas). En algunas ocasiones no hay evidencias de su ocurrencia en la superficie, lo que puede ser debido a que se encuentran sepultadas por encontrarse en una etapa temprana de su formación o por la erosión; en otras palabras, se ha borrado evidencias superficiales de su existencia. La aplicación de métodos geofísicos, pueden ayudar a la detección de dichas discontinuidades sepultadas.

Aunque se han documentado diversos mecanismos de formación de este tipo de discontinuidades del terreno, la metodología para determinar la susceptibilidad que un terreno pueda presentar discontinuidad en el futuro sigue siendo un tema de investigación. Este trabajo contribuirá a vislumbrar aquellas fallas y fracturas que no son evidentes a simple vista.

El norte del estado de Aguascalientes donde se encuentra el municipio de Jesús María, Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo y Rincón de Romos son los más afectados por subsidencia y fracturamiento; por esta razón se realizó esta investigación en los municipios de Jesús María y norte de Aguascalientes, donde la población es mayor y tienen un gran número de discontinuidades.

## **1.2 Objetivo General**

Desarrollar una metodología para determinar la susceptibilidad de generación de fracturamientos y fallamientos asociados a subsidencia y reactivación de paleocauces, y en las zonas donde ya exista la discontinuidad establecer la zona activa de la falla.

## **1.3 Objetivos Particulares**

- Obtener perfiles de tomografía eléctrica resistiva.
- Determinar la configuración estratigráfica en las fallas utilizando el método de resistividad eléctrica.
- Analizar la información e identificación de variables geotécnicas presentes en la estratigrafía que están asociadas al fallamiento.
- Clasificar los materiales del valle de acuerdo a la resistividad obtenida en laboratorio.
- Obtener perfiles de refracción sísmica y MASW.

- Realizar gráficos entre la velocidad de las ondas sísmica y la distancia para encontrar anomalías en el comportamiento de la velocidad de las ondas sísmicas.
- Determinar la zona activa de la falla por medio del método sísmico.

#### **1.4 Alcances**

La investigación es de carácter mixto debido a que se utilizan parámetros cuantitativos y cualitativos. Los parámetros cuantitativos fueron producto de pruebas geofísicas, siendo estos: resistividad eléctrica y velocidades de ondas sísmicas P y S. Con la ayuda de estos parámetros se determinaron propiedades mecánicas del suelo, tipo de material y estratigrafía de la zona de estudio. Los datos cualitativos fueron producto de los perfiles de tomografía eléctrica resistiva, de refracción sísmica y gráficos unidimensionales de velocidad de onda sísmica. Con base en estos perfiles y gráficos se interpretó la estratigrafía de la zona, presencia de discontinuidades y profundidad del lecho rocoso.

El método de tomografía eléctrica permitió prospectar a una mayor profundidad, siendo esta de 40 metros, mientras que el método de refracción sísmica únicamente alcanzó hasta 10 metros.

La investigación se realizó a través de exploración geofísica y observación física en campo.

#### **1.5 Justificación**

Actualmente, el peligro asociado a fallas por subsidencia en la Ciudad de Aguascalientes y el municipio de Jesús María se determina en base a la cartografía de fracturas y fallas. Sin embargo, se ha reportado que varias de estas discontinuidades cartografiadas han experimentado un alargamiento posterior a la fecha de registro (Hernández-Marín et al. 2015 y Pacheco-Martínez et al. 2013). Por lo tanto, es necesario el desarrollo de una metodología que ayude a determinar la susceptibilidad de que se generen fallas asociadas a subsidencia en un futuro, esto a su vez permitirá generar una zonificación que podría ser usada para una planeación urbana con una probabilidad menor de afectaciones físicas en construcciones por subsidencia. Además, es importante para todas las personas conocer la zona de influencia de una falla, esto ayudará a tener una mejor planificación urbana y evitará la pérdida de por daños en infraestructura.

## 1.6 Hipótesis

La configuración estratigráfica es el principal factor condicionante relacionado con la generación de discontinuidades superficiales. La aplicación de pruebas geofísicas permite determinar la configuración estratigráfica en sitios con discontinuidades y sin discontinuidades. Conocer dicha configuración estratigráfica permite identificar las zonas susceptibles de que se generen discontinuidades.

Al aparecer una discontinuidad en el suelo, se alteran algunos parámetros físicos y mecánicos como lo son la densidad, módulo de *Young* y relación de *Poisson*. Estos parámetros son las principales variables que determinan las velocidades de las ondas sísmicas, las cuales, al pasar en una zona con la presencia de una discontinuidad, disminuyen su velocidad. De esta manera es posible la determinación de la zona activa de la falla utilizando ondas sísmicas.



## 2 MARCO TEÓRICO

---

Las bases teóricas con las que se ha realizado esta investigación serán descritas en este capítulo. Se conocerán los diferentes métodos geofísicos y sus principios básicos. Se explicará el método de resistividad eléctrica, refracción sísmica y MASW (*Multiple-Channel Analysis of Surface Waves*).

### 2.1 Métodos Geofísicos

Los métodos geofísicos son utilizados en todo el mundo para el estudio de aguas subterránea, de las discontinuidades en el suelo, de las propiedades mecánicas del subsuelo y su estratigrafía y yacimientos de hidrocarburos (Sauret et al 2015, Groves et al. 2011, Sass, 2007, El-Hussain et al. 2014; Instituto Mexicano del Transporte , 2003). Entre los métodos geofísicos se pueden distinguir diferentes tipos: magnéticos, gravimétricos, eléctricos y sísmicos. Los métodos de resistividad eléctrica tienen diferentes acomodos o técnicas, los principales son: Schlumberger y dipolo-dipolo. Los métodos sísmicos más utilizados son: refracción sísmica, MASW 1D, MASW 2D, ReMi, (Groves et al. 2011). Además, los métodos geofísicos se pueden agrupar de acuerdo a sus características de aplicación como: activos, pasivos, estáticos y dinámicos. En los activos se estimula al suelo de manera artificial; en los pasivos se detectan las variaciones de fuentes naturales; en los estáticos se mide la variación espacial de un campo estático, no varían en el tiempo; y en los dinámicos se miden las variaciones espaciales de los campos transitorios (Instituto Mexicano del Transporte 2003).

### 2.2 Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos consisten en aplicar un flujo de energía eléctrica a través del objeto de estudio, para determinar la resistividad al flujo eléctrico que se encuentra en la masa de este. El método de resistividad eléctrica se puede aplicar de tres maneras diferentes: sondeos eléctricos verticales (SEV), calicatas y tomografía eléctrica resistiva (TER), en esta investigación se utilizaron tomografías eléctricas.

### 2.2.1 Resistividad eléctrica

Este método mide la resistividad ( $\Omega\cdot m$ ) o su recíproco, conductividad eléctrica (S/m). La prueba requiere de 4 electrodos, 2 introducen corriente (I) y otros dos cambios de potencial ( $\Delta V$ ), (Groves, et al., 2011). La Figura 2.1 muestra el esquema general para este método, la resistividad del suelo se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left\{ \left[ \frac{1}{r_{AC}} - \frac{1}{r_{CB}} \right] - \left[ \frac{1}{R_{AD}} - \frac{1}{R_{DB}} \right] \right\}} \quad (2-1)$$

Donde  $r_{AC}$ ,  $r_{CB}$ ,  $R_{AD}$  y  $R_{DB}$ , son las longitudes de las posiciones de los electrodos. Con una mayor separación entre los electrodos se puede observar más profundidad y viceversa, reduciendo estas distancias se puede profundizar menos, aunque se tienen imágenes más detalladas de una zona específica.

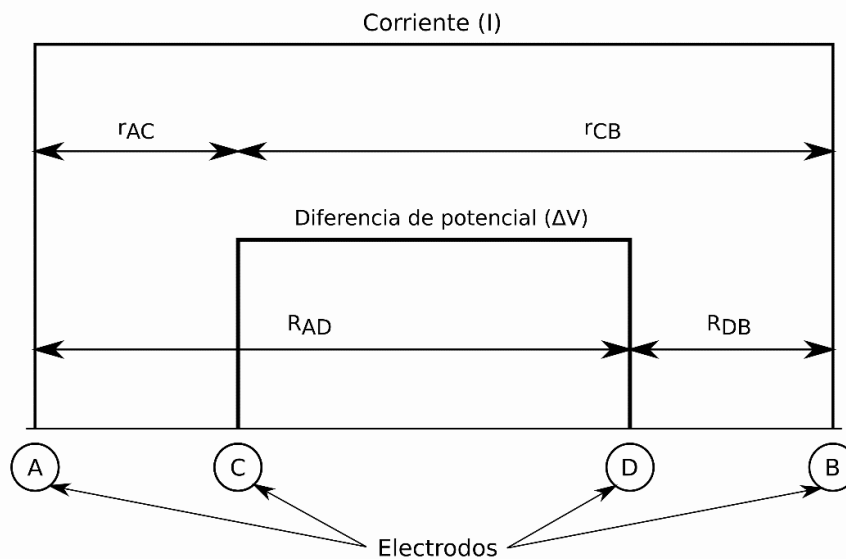
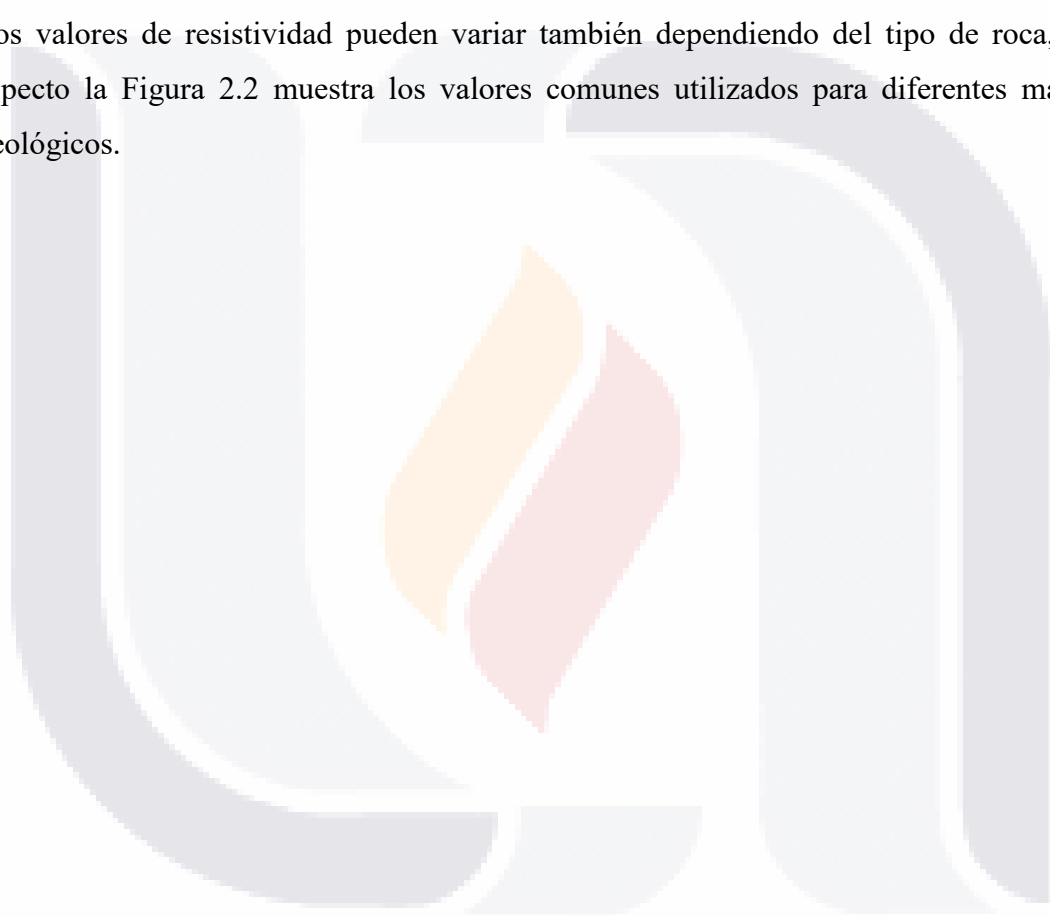


Figura 2.1 Configuración general para resistividad eléctrica. Tomado de Groves et al., (2011).

Según Groves et al., (2011) el uso de la resistividad eléctrica puede ser utilizada para conocer los estratos en una zona, si adicionalmente se conocieran la configuración de la estratigrafía en pozos de la zona se podría realizar un mejor interpretación de los perfiles. La aplicación de este método tiene factores que pueden hacer variar los resultados como:

- Grado de saturación del subsuelo
- Concentración de electrolitos en los poros
- Porosidad
- Temperatura del suelo
- Estado del agua en los poros
- Cantidad de arcilla mineral y coloidales

Los valores de resistividad pueden variar también dependiendo del tipo de roca, en ese aspecto la Figura 2.2 muestra los valores comunes utilizados para diferentes materiales geológicos.



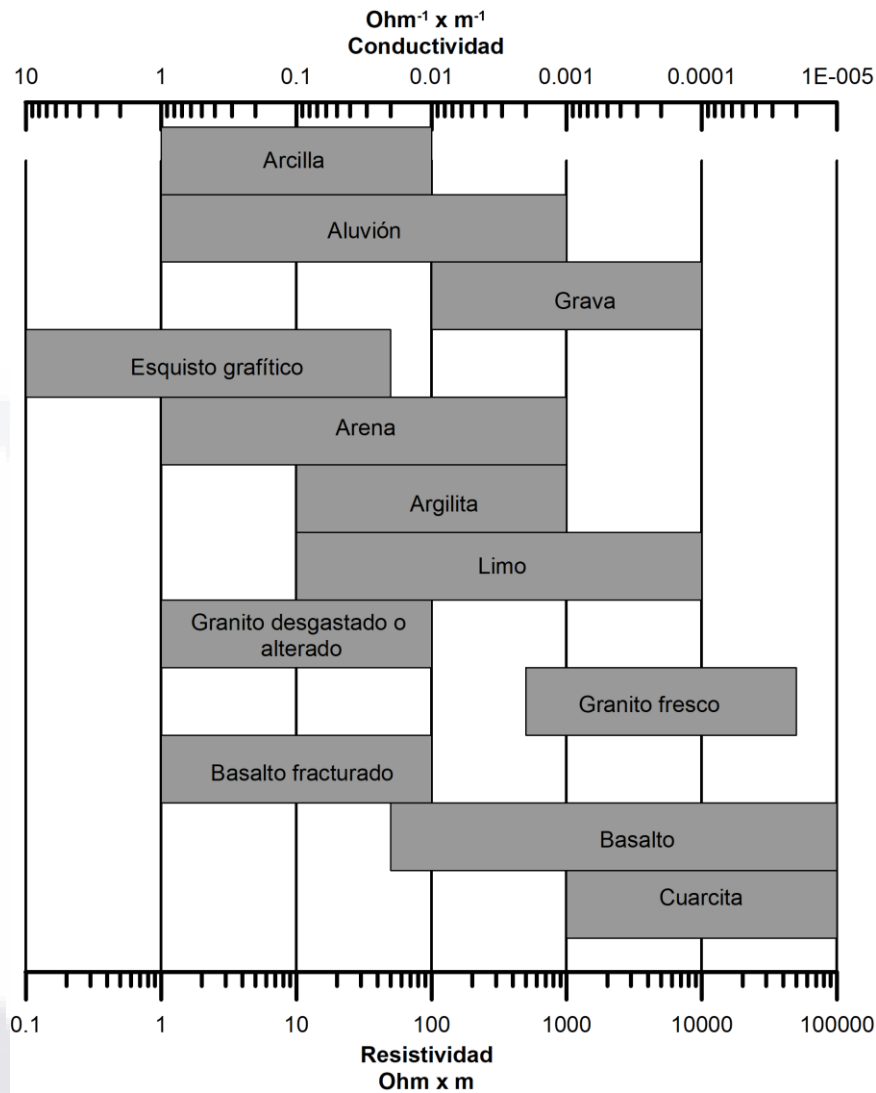


Figura 2.2 Rangos típicos para resistividad y conductividad en suelos y rocas. Modificado de Lowrie, (2007).

### 2.3 Métodos sísmicos

Son aquellos donde se utilizan las velocidades de propagación de las ondas sísmicas a través del medio, y con base en su variación se pueden realizar la determinación de propiedades mecánicas del medio. Pueden ser activos o pasivos, dependiendo la fuente de generación de dichas ondas. Dentro de los tipos de ondas sísmicas hay dos principales ramas: ondas de cuerpo y ondas superficiales. Las ondas de cuerpo están conformadas por la onda principal (p) y secundaria (s) también conocidas como compresión y cortante. Las ondas de superficie *Raleigh* y *Love*. Las Tablas 2.1 y 2.2 muestran los rangos usuales para velocidades de compresión y cortante respectivamente en diferentes materiales geológicos.

Tabla 2.1 Rango usual de velocidades de Onda P, para los materiales geológicos. Tomado de IMT (2003).

Tipo de material	Velocidades de compresión	
	(Vp) (m/seg)	
Material superficial (capa de alteración de suelos y rocas)	305	610
Grava, arena y arcilla (seca y húmedas)	468	915
Arena húmeda	610	1830
Areniscas y lutitas	1830	4270
Caliza	2140	6100
Granito	4580	5800
Rocas metamórficas	3050	7020

Tabla 2.2 Velocidades promedio de onda S por la NEHRP para diferentes tipos de materiales para una profundidad de 30 metros, medidos desde la superficie. Tomada de Schmidt, (2010).

Tipo de material	Vs 30 (m/seg)	Descripción
A	>1500	Roca dura
B	760 - 1500	Roca
C	360 – 760	Roca blanda y suelo muy denso
D	180 – 360	Suelo rígido
E	< 180	Suelo blando
F	Suelos especiales (licuables, colapsables, arcillas muy plásticas, suelos orgánicos)	

### 2.3.1 Refracción sísmica

Es una metodología para estudiar las velocidades de ondas de compresión u ondas “P” y de cortante o “S”, a medida que viajan en las capas del suelo homogéneo. Esta prueba requiere de un acomodo de geófonos, que miden el movimiento vertical y horizontal de una fuente sísmica. Las fuentes sísmicas pueden ser: explosivos, martillo semi hidráulico, peso de libre

caída. Las ecuaciones que describen la velocidad de cada onda está dada por las siguientes ecuaciones (Groves et al. 2011):

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2-2)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-3)$$

Donde:

$V_p$  = Velocidad de la onda P

$V_s$  = Velocidad de la onda S

$E$  = Módulo de *Young*

$\nu$  = Relación de *Poisson*

$G$  = Módulo de cortante

$\rho$  = Densidad del medio

$K$  = Módulo de *Bulk* (B)

Según Instituto Mexicano del Transporte (IMT, 2003), las siguientes ecuaciones para el cálculo de: relación de *Poisson*, módulo de *Young*, módulo de rigidez y módulo de *Bulk* se obtienen a partir de las velocidades de onda.

Relación de Poisson ( $\nu$ )

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2} \quad (2-4)$$

Módulo de Young (E)

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2-5)$$

Módulo de Rigidez (G)

$$G = \rho V_s^2 \quad (2-6)$$

Módulo de Bulk (B)

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (2-7)$$

El acomodo típico de los geófonos para dos estratos los cuales tienen diferentes densidades y por lo tanto distintas velocidades de propagación se observa en la Figura 2.3. El estrato superior tiene una velocidad de onda inferior ( $V_1$ ) a la velocidad del estrato dos ( $V_2$ ), por lo cual los geófonos (círculos negros) cercanos a la fuente sísmica (estrella en color rojo) reciben la onda primero a través del estrato uno. Al momento que la onda sísmica toca el estrato dos, su velocidad de propagación que es mayor a la del estrato uno, hace que la onda sísmica pueda llegar a los geófonos siguientes, ósea que la onda sísmica viaja por el estrato uno, entra al dos y finalmente regresa al estrato uno para llegar al geófono. Como las distancias entre los geófonos son iguales y las velocidades constantes se pueden visualizar la pendiente uno. La pendiente dos, la cual tiene menor inclinación debido a que los tiempos de llegada en ese estrato son menores por lo cual la velocidad de propagación es mayor. Por tal motivo para este método es normal que las pendientes sean menores conforme la onda avanza, cualquier cambio diferente en la pendiente se considera una anomalía en el suelo. La distancia que hay desde el origen de la onda al cambio de pendiente es llamada distancia crítica la cual indica el cambio de estrato (Groves et al. 2011).

La profundidad del cambio de estrato ( $z$ ) puede ser calculada con la ecuación:

$$z = \frac{T_i V_1 V_2}{2\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad (2-8)$$

Donde:

$z$  = Profundidad

$T_1$  = Tiempo de llegada con respecto a la pendiente de la velocidad dos

$V_1$  y  $V_2$  = Velocidad uno y velocidad dos, respectivamente

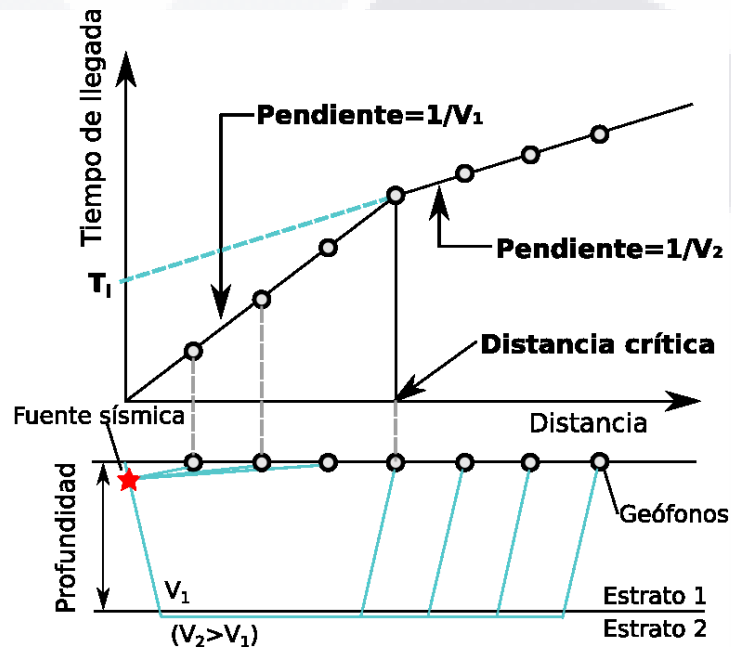


Figura 2.3 Caso general para dos capas con el método de refracción sísmica. Al viajar la onda sísmica del estrato uno al dos su velocidad aumenta, esto ocasiona que la pendiente disminuya, este cambio de pendiente indica la existencia de otro estrato subsecuente. La línea azul muestra como viajan las ondas a través del medio, la estrella roja representa la fuente sísmica y origen de las ondas sísmicas. Modificada de Groves et al, (2011).

### 2.3.2 MASW (Multiple-Channel Analysis of Surface Waves)

Al igual que el método de refracción sísmica el método de MASW utiliza un arreglo de geófonos y una fuente sísmica para la generación de ondas sísmicas superficiales *Love* y *Rayleigh* las cuales, dependen no solo de las propiedades del suelo también de la frecuencia con que se genera dicha onda. La profundidad a la que la onda penetra dentro del suelo está en función de la longitud de onda ( $\lambda$ ); una onda de mayor longitud puede llegar a mayor profundidad (Figura 2.4).



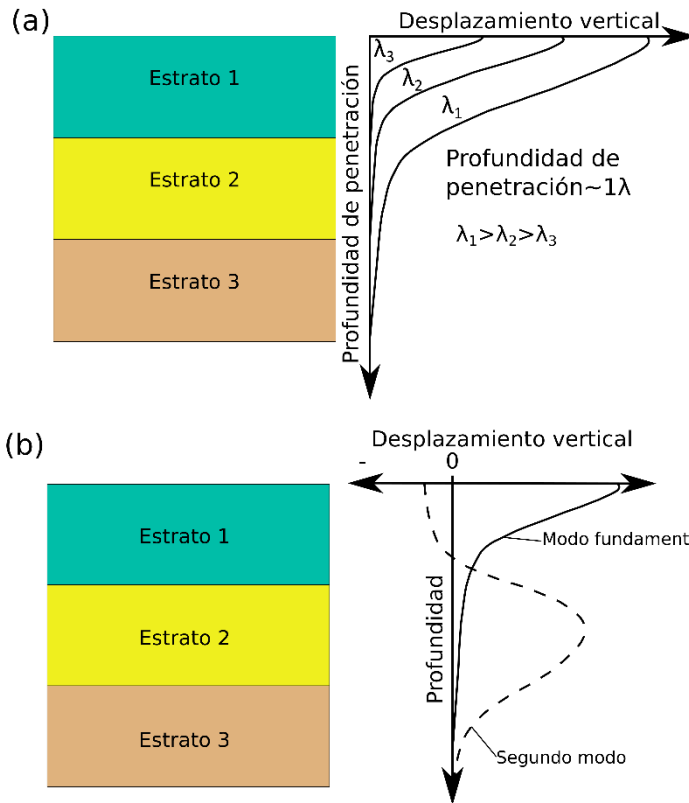


Figura 2.4 Modelo de ondas superficiales (a) profundidad de penetración de ondas superficiales (b) modos de ondas superficiales. Tomada de Groves et al, (2011).

Las ondas superficiales pueden ser usadas para calcular la velocidad de la onda de cortante (S) (Groves et al. 2011).

$$Velocidad\ de\ onda = Frecuencia * \lambda \tag{2-9}$$

Según Groves et al., (2011) la onda Raleigh está dada en función de la onda S y la relación de Poisson.

$$V_R \approx \frac{0.875 + 1.117 \nu}{1 + \nu} V_S \tag{2-10}$$

Las ondas superficiales tienen diferentes modos de propagación, el modelo fundamental es el más importante para el estudio de MASW ya que la mayor parte de las ondas se localizan en la superficie del suelo. Para este método se analiza todas las frecuencias a diferencia del

método de refracción sísmica en el cual se utilizan los primeros arribos, la diferencia de fases como una función de la frecuencia ( $\Delta\varphi(f)$ ) entre dos geófonos adyacentes se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta\varphi(f) = fase[G(f)F^*(f)] \quad (2-11)$$

En donde  $G(f)$  y  $F(f)$  son las transformadas de Fourier de las señales de tiempo desde el segundo al primer geófono, El asterisco (\*) indica el complejo conjugado.



### 3 ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

---

El estudio de la subsidencia producto de la sobre explotación de agua subterránea ha generado diferentes investigaciones en todo el mundo. En estos días ya se tiene un conocimiento más claro de los agentes que facilitan aparición de subsidencia como: valles lacustres y aluviales, materiales altamente consolidables y una extracción de agua subterránea mayor a la recarga. En este capítulo se muestran las principales investigaciones sobre subsidencia, generación de fracturas y métodos geofísicos para detección de discontinuidades.

#### 3.1 Mecanismos de fracturamiento

Las diferentes condiciones que se presentan ante la generación de una discontinuidad en compañía del fenómeno de subsidencia están relacionadas con la configuración estratigráfica, variación en los espesores de los materiales, descenso del nivel freático, propiedades mecánicas del suelo, antiguas fallas que fueron sepultadas y de origen tectónico. Estas fueron las principales características que se encontraron en la literatura. A continuación, se mencionan las principales investigaciones y sus aportaciones.

Según Burbey (2002), la formación de fracturas asociadas subsidencia está generalmente presente cuando ocurren condiciones que favorecen el desarrollo de discontinuidades: 1) Clima árido o semiárido 2) la explotación del agua subterránea es mayor a la recarga natural 3) suelos poco consolidados 4) discontinuidades en la conductividad hidráulica, relacionada con la litología 5) Compactación vertical diferencial. Además, demuestra que la deformación horizontal está en función de la distancia al centro de bombeo, según las modelaciones realizadas.

De acuerdo con Sheng (2003), las fuerzas que generan las fracturas se pueden dividir en dos tipos: 1) no hidráulicas, son aquellas donde otros factores no hidráulicos como la configuración estratigráfica o propiedades mecánicas facilitan el desarrollo de

discontinuidades 2) hidráulicas, aquellas que están directamente relacionados con el flujo de agua.

Los factores no hidráulicos que facilitan la generación de fracturas son: 1) protuberancias en el lecho rocoso; 2) fuertes cambios de pendiente en el basamento; 3) variación vertical en la estratigrafía; 4) fallas antiguas que fueron sepultadas con materiales compresibles; 5) desarrollo de nuevas discontinuidades al final de la zona de hundimientos; y 6) Diferentes valores de porosidad efectiva en los materiales (Larson y Pewe 1986; Larson ,1987; Slaff, 1993; Sheng ,2003; Pacheco-Martínez et al. 2013; Zhang et al. 2016). Estas discontinuidades son formadas por la variación de los esfuerzos efectivos generados por la extracción de agua (Budhu, 2008; Budhu y Adiyaman ,2009). Las fracturas hidráulicas se forman a partir de las fuerzas hídricas que se generan duran la extracción de agua subterránea y en presencia de un plano de falla (Helm 1994a; Sheng, 2003; Hernández-Marín y Burbey 2010).

Con base en los mecanismos encontrados en la literatura, se analizaron las variables asociadas a la formación de discontinuidades en el suelo que tienen que ver con la estratigrafía, estas son:

- *Presencia de protuberancias enterradas*, formadas en el lecho rocoso. Al disminuir el nivel freático, las protuberancias enterradas generan variación diferenciada en los esfuerzos efectivos, lo cual favorece la aparición de fallas y fracturas superficiales (Figura 3.1).

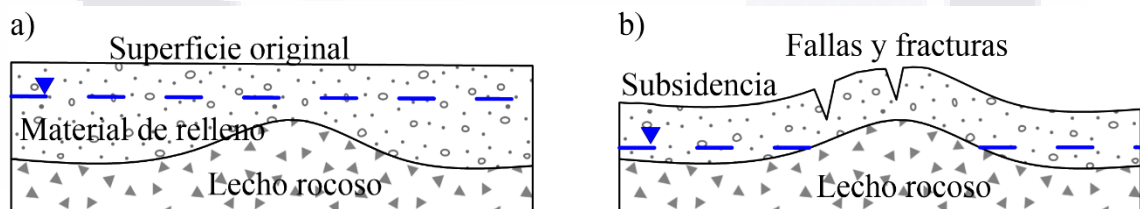


Figura 3.1 Protuberancia en el lecho rocoso. a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson, y Pewe (1986).

- *Discontinuidades relacionadas con la profundidad del agua subterránea, después de su extracción*. Al disminuir el nivel freático, se modifican los esfuerzos efectivos, por

lo cual en la parte superficial se generan fracturas sobre la posición inicial del nivel freático antes de su abatimiento (Figura 3.2).

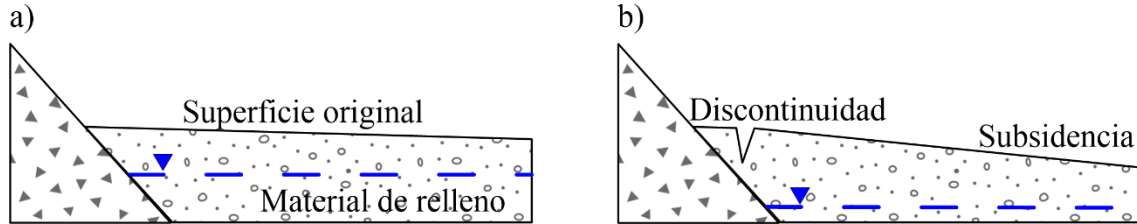


Figura 3.2 Discontinuidad relacionada con el nivel del agua subterránea a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson y Pewe (1986).

- *Fuertes cambios de pendientes en el lecho rocoso.* Las fuertes pendientes después del abatimiento del nivel freático generan subsistencia, y esta subsistencia, a su vez puede ser diferenciada debido a los espesores diferenciados del material de relleno, lo cual genera discontinuidades en la superficie donde el cambio de pendiente en el lecho rocoso es pronunciado (Figura 3.3).

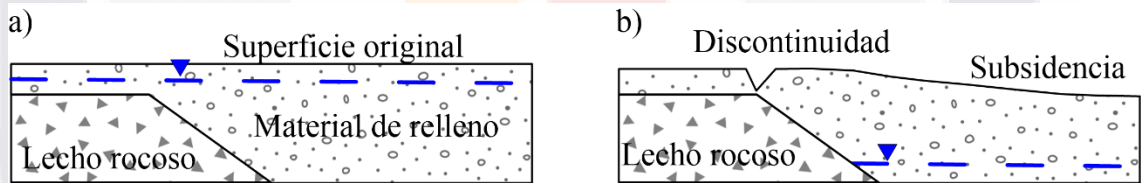


Figura 3.3 Fuertes pendientes en el lecho rocoso a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson (1987).

- *Sistema de fallas paralelas donde inicia la zona de relleno.* La disminución en el nivel freático genera subsistencia y conforme el nivel continúa disminuyendo se generan discontinuidades superficiales paralelas (Figura 3.4).

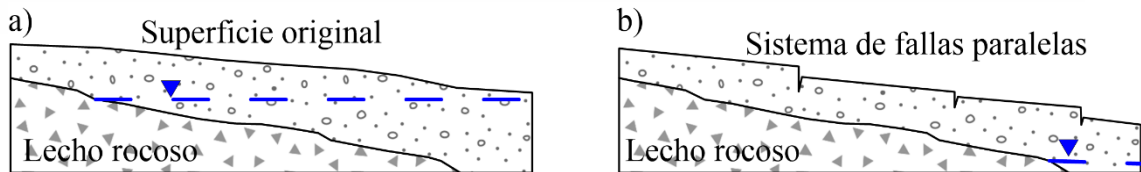


Figura 3.4 Pendientes bajas en el lecho rocoso a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson (1987).

- *Variación vertical de estratos, al disminuir el nivel freático se genera subsidencia.* Las diferentes compresibilidades en los materiales generan asentamientos diferenciales, los cuáles se manifiestan en la superficie como fallas o fracturas (Figura 3.5).

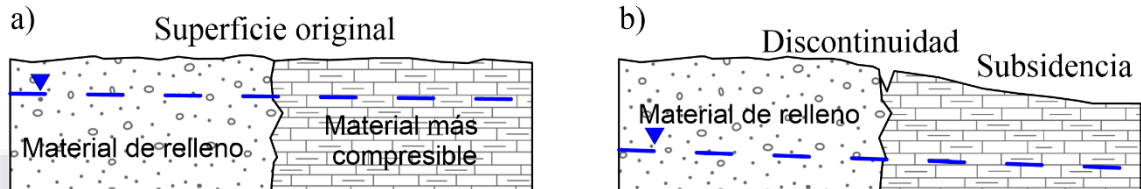


Figura 3.5 Variación vertical en los estratos a) Antes del bombeo b) Después del bombeo. Modificada de Larson (1987).

- *Fallas antiguas sepultadas por material compresibles.* Al disminuir el nivel freático en una zona la cual subyace una falla se generan esfuerzos efectivos diferenciales por la variación del nivel freático y la topografía del lecho rocoso. La presencia de subsidencia en estratos de diferentes espesores favorece la aparición de fallas superficiales. Estas fallas continúan con la trayectoria ascendente de la antigua falla. En otras palabras, el material de relleno del valle se compacta en diferentes magnitudes de acuerdo a sus espesores, el lecho recoso no presenta movimientos o desplazamientos solo facilita la continuación de la falla en la misma dirección. Como es una falla antigua, presentó movimiento antes de que se origine la subsidencia y ahora esta inactiva, esto origina que existen estratos que fueron desplazados cuando la falla estuvo activa y continuarán en movimiento cuando el fenómeno de subsidencia inicie. Este mecanismo se conoce como reactivación de fallas por subsidencia (Figura 3.6).

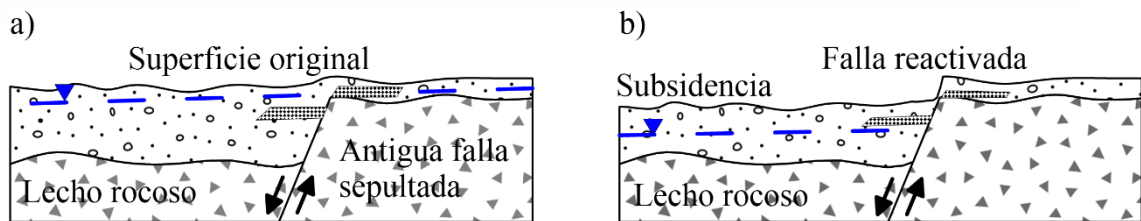


Figura 3.6 Falla antiguas sepultadas. a) Antes del bombeo, ya existen estratos desplazados verticalmente antes del proceso de subsidencia b) Después del bombeo. Modificada de Slaff (1993).

- *Reactivación de paleocauces*. El flujo de agua a través de un paleocauce genera arrastre de partículas finas, lo que crea vacíos en el dentro del paleocauce. Estos vacíos con el tiempo se manifiestan en una discontinuidad superficial. Este tipo de discontinuidades ocurren de manera súbita, a diferencia de las generadas por subsidencia (Figura 3.7).

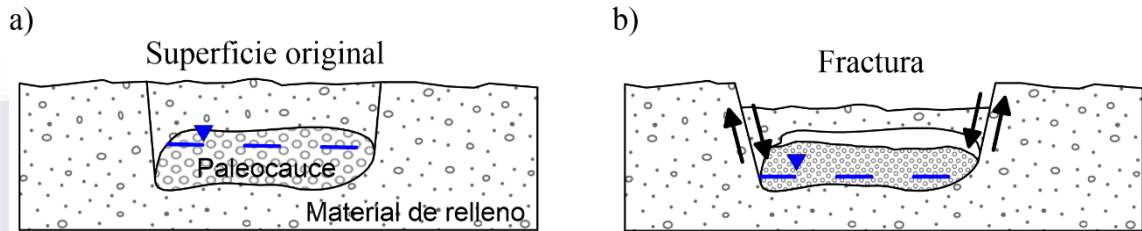


Figura 3.7 Fractura por reactivación de paleocauces a) Antes del flujo subterráneo b) Después de flujo. Modificada de Pacheco-Martínez et al. (2013).

Además de los mecanismos que estudian la configuración estratigráfica, existen otras variables que pueden favorecer la generación de discontinuidades; la presencia de una falla mientras hay bombeo de agua subterránea, puede ayudar a la formación de discontinuidades.

Las fuerzas hidráulicas, principalmente su componente horizontal, tienen un papel muy importante en la generación de fracturas. Existen dos tipos de mecanismos asociados con el agua subterránea, en zonas activas y en zonas pasivas. La zona activa está conformada por los materiales dentro del acuífero los cuales están saturados y son deformados directamente con la extracción de agua, la zona pasiva es aquella que no está en la zona saturada del material y se deforma en dirección de flujo ( Helm, 1994).

Con base en Hernández-Marín y Burbey (2010), la formación de discontinuidades creadas por bombeo en presencia de discontinuidades pueden ser agrupadas en tres modelos conceptuales: a) Modelo de viga flexionada, las fracturas se generan por asentamientos diferenciales, la falla se genera en la superficie, la falla existente tiende a rotas por efecto de los esfuerzos creados por el bombeo, la falla es creada del lado de la falla donde no existe bombeo; b) Modelo de Helm, las discontinuidades son formadas tanto por desplazamientos verticales como horizontales, los esfuerzos creados por el bombeo generan discontinuidades, las discontinuidades son creadas entre el pozo de bombeo y la falla existente; c) Modelo de desplazamiento discontinuo horizontal. Las discontinuidades son producto de la acumulación

e esfuerzos en la falla, las fracturas son originadas sobre el nivel freático y avanzan hacia la superficie (Figura 3.8).

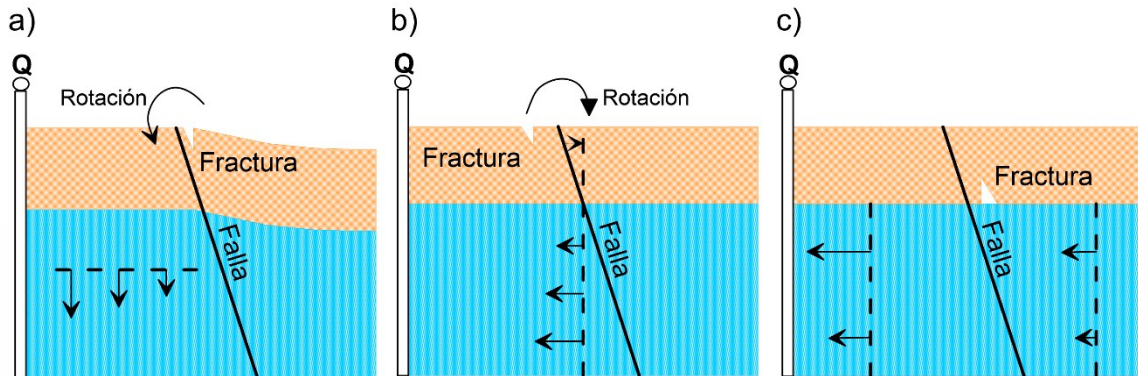


Figura 3.8 Modelos conceptuales de fracturamientos en presencia de fallas, la flechas en color negro indican la dirección del agua a) Modelo de viga flexionada b) Modelo de Helm c) Modelo de desplazamiento discontinuo horizontal. La potencial rotación indicada en los incisos a) y b) está referida al plano de falla. Q hace referencia a un pozo de bombeo Tomada de Hernández-Marín y Burbey (2010).

### 3.2 Estudios geofísicos y geológicos

La ubicación de discontinuidades en el suelo es un proceso en el cual se realizan diferentes técnicas. Las técnicas más comunes son: 1) mediciones geofísicas 2) clasificación geológica 3) recorridos en campo y excavación de trincheras con la finalidad de observar la discontinuidad.

Para la localización de discontinuidades se han aplicado diferentes métodos geofísicos los cuales han mostrado diferentes resultados, el método de refracción sísmica y tomografía eléctrica resistiva son los de mayor uso y mejores resultados (Groves et al. ,2011). Sin embargo, existen otros métodos que también han demostrado buenos resultados como: MASW , radar de penetración terrestre (GPR) y ruido ambiental (El-Hussain et al. 2014; Iodice et al. 2016; Pueyo Anchuela et al. 2016).

La exploración de campo consiste en realizar un recorrido con por los lugares buscando escarpes, diferentes tipos de suelos, hoyos o alguna otra señal de discontinuidad. La observación de imágenes aéreas puede ayudar a encontrar señales de discontinuidades, se han observado que sobre las fallas se alinean árboles o arbustos, esto podría ser una señal de la existencia de alguna discontinuidad (Pacheco-Martínez et al. 2013).



Las trincheras, que consisten en una excavación a cielo abierto tienen la finalidad de confirmar la existencia de una discontinuidad, una vez que se han realizado pruebas geofísicas y se han observado anomalías probablemente por la presencia de una discontinuidad. Se realiza la excavación perpendiculares a la traza supuesta de la falla, con esto es posible distinguir si existen oquedades, estratos discontinuos o alguna señal de la existencia de una falla (Pacheco-Martínez et al. 2013; Pueyo Anchuela et al. 2016). Además, se pueden extraer muestras de suelo para hacer pruebas en laboratorio.

El método de resistividad eléctrica tiene buenos resultados para describir el lecho rocoso en profundidades de 4.60 a 10.70 metros (Groves et al. 2011). Este mismo método se ha utilizado para investigar configuraciones estratigráficas que facilitan la generación de fracturas, donde concluyen que la topografía subsuperficiales es el principal factor para el desarrollo de discontinuidades superficiales (Youssef et al. 2014). En zonas donde existen paleocauces asociados a materiales fluviales se han determinados rangos de valores para la determinación de paleocauces (Zainal et al. 2017).

El método de refracción sísmica y MASW son eficientes para conocer la estratigrafía, profundidad del basamento y propiedades mecánicas como: relación de *Poisson*, módulo de *Young*, módulo de cortante y valore de N para la prueba de penetración estándar (Groves et al. 2011; Adegbola et al. 2013 ).

La zona activa de la falla esa la zona delimitada por líneas paralelas a la falla hacia ambos lados, esta zona se caracteriza por presentar desplazamientos y es necesaria su delimitación para el desarrollo de infraestructura. El método de gravimetría se ha utilizado para realiza para determinar esta área (Pacheco-Martínez et al. 2006). También los métodos sísmicos han dado respuesta a zonas con presencia de discontinuidades, se han realizado investigaciones en rocas con fracturas las cuales muestran una pérdida de velocidad al viajar por dicha zona (Ferrill et al. 2017). Adicionalmente pruebas sobre fracturas de origen volcánico fueron estudiadas con ondas sísmicas, mostrando una zona de baja velocidad relacionada con la falla (Imposa et al. 2015).

## 4 METODOLOGÍA

---

En términos generales la metodología consistió en realizar una caracterización geofísica a cada sitio de estudio. Dicha caracterización se basó en establecer la configuración estratigráfica somera (hasta 40 metros de profundidad), determinar la presencia de discontinuidades preexistentes no visibles en la superficie, y determinar la velocidad de propagación de ondas sísmicas del terreno afectado por fracturamientos. Se realizó un inventario de discontinuidades en el valle de Aguascalientes, y con base en él, se consideraron cuatro tipos de discontinuidades de acuerdo a su mecanismo de aparición: (1) por subsidencia, (2) por reactivación de paleocauce, (3) fallas que han existido desde hace mucho tiempo y con el efecto de subsidencia se han presentado actividad nuevamente y (4) por tectonismo.

Los estudios fueron realizados en la zona comprendida entre la falla oriente y poniente, dentro del área que ocupa los municipios de Jesús María y Aguascalientes. La Figura 4.1 muestra la ubicación de la zona de estudio. Las mediciones se realizaron en 11 sitios con registro de discontinuidad por parte del SIFAGG o el final de una falla, entendiéndose final de falla como la prolongación de la falla, simplemente que en esta zona no existe registro de la falla y tampoco se observa una discontinuidad superficial. Los 11 lugares fueron agrupados en cinco regiones de acuerdo al origen de las fallas contenidas. Así, las regiones uno y dos, se localizan en el centro del valle, donde la mayoría de las discontinuidades son producto de la subsidencia. La región tres, al poniente de la Posta sitio propiedad de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, en este sitio la falla es de origen tectónico. La región cuatro, al norte de Jesús María, en este lugar la discontinuidad estudiada fue creada por la reactivación de un paleocauce. La región cinco, al oriente de la ciudad de Aguascalientes, presenta una falla antigua que ha sido reactivada por el efecto de la subsidencia (Figura 4.1).

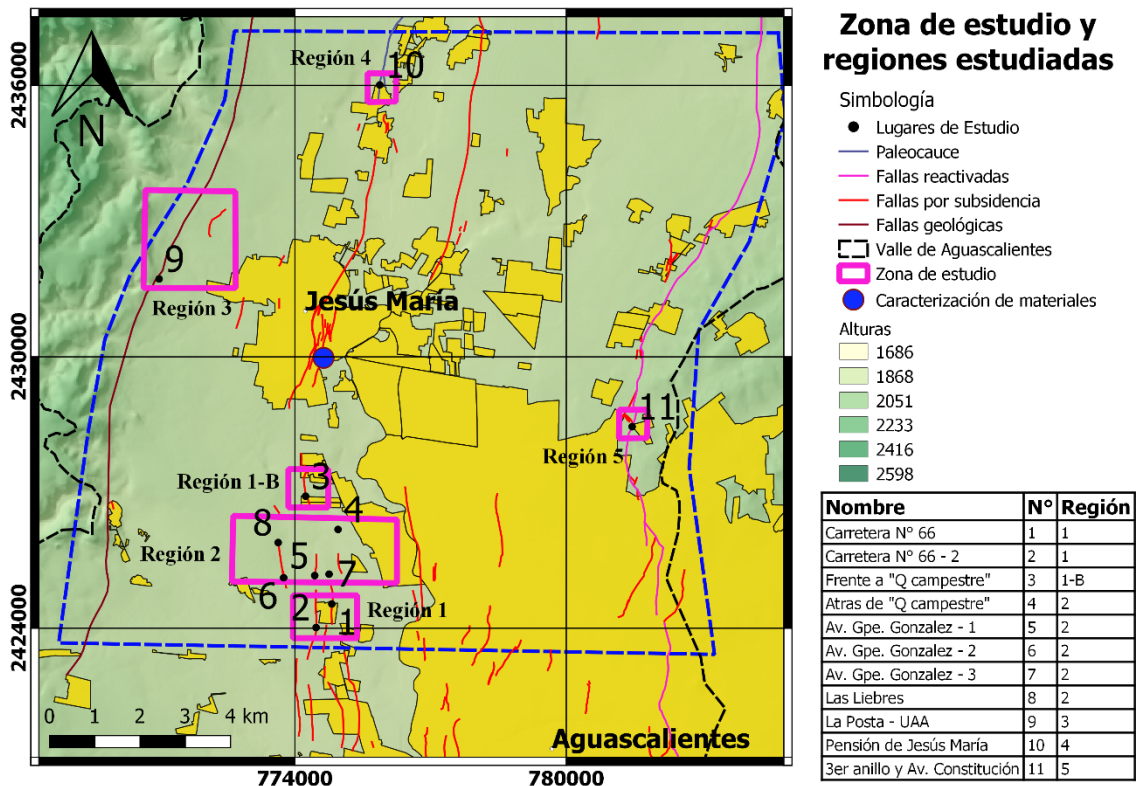


Figura 4.1 Ubicación de zona de proyecto de investigación y lugares donde se realizaron las mediciones. Los números adyacentes a los lugares de estudio representan los sitios de las mediciones, los rectángulos de color magenta representan las regiones estudiadas.

Con el método de resistividad eléctrica aplicado en este estudio, fue posible observar diferentes tipos de estratos y conocer la existencia de alguna discontinuidad en el suelo. El arreglo utilizado fue dipolo-dipolo, ya que es de mayor eficiencia para identificar estratigrafía horizontal. Para este arreglo se utilizaron 24 electrodos, espaciados a cada 10 metros, lo cual representa la mayor abertura posible entre electrodos para este método. La profundidad de medición fue de 40 metros. El equipo utilizado es un resistímetro marca Iris modelo SYSCAL Jr.

Las mediciones sísmicas utilizadas fueron refracción sísmica y *MASWID*. La onda sísmica fue creada con un mazo de 10 libras golpeado sobre una placa de acero en contacto directo con el suelo. El equipo utilizado fue un sismógrafo marca *Geode* modelo *Ultra-light*. Estos métodos ayudaron a obtener parámetros mecánicos del suelo y configuración estratigráfica. Para el método de refracción sísmica se utilizaron arreglos de 24 geófonos de 4.5 Hz, con una separación de dos metros, con el fin de poder tener una mayor longitud y profundidad de

exploración. Se utilizaron tres mediciones para poder crear un perfil de mayor longitud, para esto fue necesario realizar un traslape de 10 metros entre cada medición (Figura 4.2). Por su parte el método *MASW 1D* se aplicó sobre los mismos perfiles en los que se aplicó refracción sísmica, utilizando 24 geófonos de 4.5 Hz separados dos metros y con mediciones en ambos extremos a una distancia de cuatro metros del primero y último geófono de cada línea. Este método es útil para analizar perfiles unidimensionales de velocidades de onda S. Con estos perfiles se identificaron variaciones en la estratigrafía entre cada una de las mediciones (Figura 4.2).

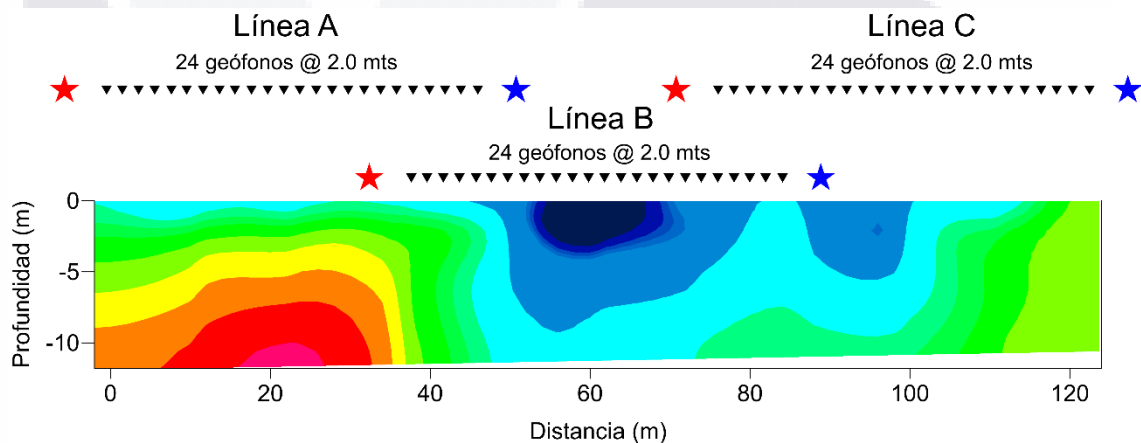


Figura 4.2 Arreglo de geófonos para el método de refracción sísmica y MASW 1D. Las estrellas en diferentes colores corresponden a los sitios donde fueron realizadas las mediciones de MASW 1D, color rojo para la medición izquierda y azul para medición derecha.

Con base en las mediciones de los primeros arribos de las ondas sísmicas se construyeron las domocronas, obtenidas del método de refracción sísmica. Una domocrona se define como la línea que une cada uno de los primeros arribos a los geófonos; el eje de las abscisas representa los valores de longitud y el eje de las ordenadas los valores del tiempo, se tendrán tantas domocronas como mediciones se hayan levantado para crear el perfil de refracción sísmica.

Con ayuda de las domocronas se determinó la velocidad entre cada geófono utilizando la fórmula de distancia sobre tiempo, las distancias fueron obtenidas de la diferencia de distancia entre cada geófono ( $D=D_n-D_{n-1}$ ) la cual fue constante, dos metros; los valores de tiempo también fueron obtenidos de la diferencia entre los tiempos de arribo para cada geófono ( $T=T_n-T_{n-1}$ ), entre mayor sea la pendiente la diferencia entre los tiempos también serán mayores (Figura 4.3 a). Las velocidades resultantes fueron graficadas en función de la

distancia. Una vez obtenidos los valores de velocidad entre cada geófono se realizó una velocidad promedio para cada distancia y se graficó nuevamente y fueron unidos con una línea (roja). A partir de la línea de promedio se realizó un ajuste de curvas con una ecuación de sexto grado y se graficó junto a los valores obtenidos anteriormente (línea azul) (Figura 4.3 b).

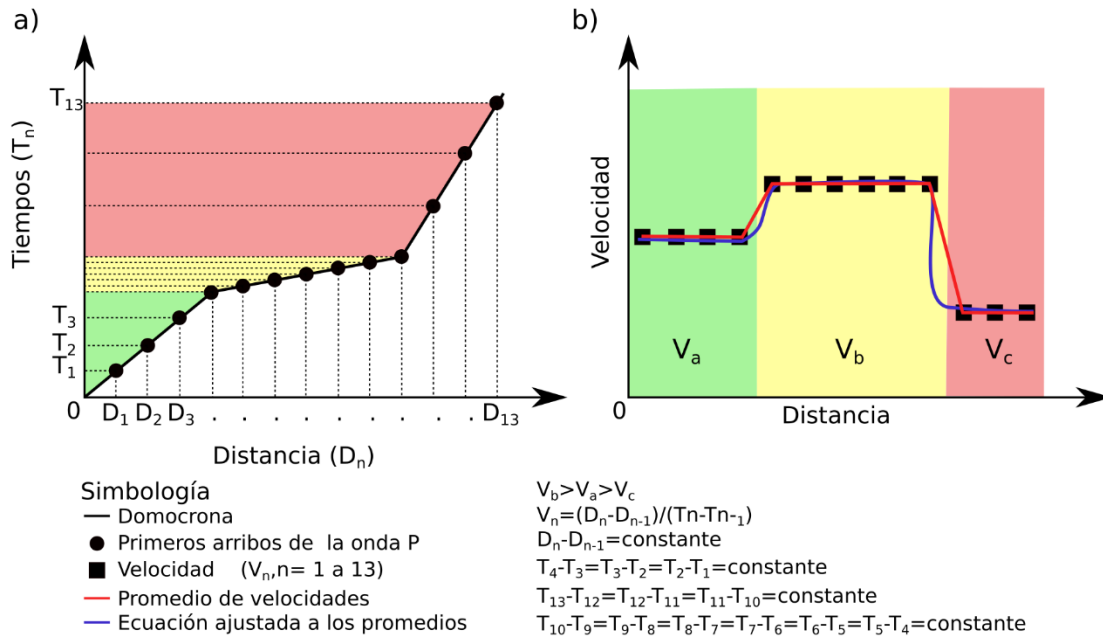


Figura 4.3 Trazo de domocrona y cálculo de valores de velocidad a) Arreglo típico para una domocrona b) Grafica de velocidades entre los geófonos (negro), velocidades promedio(roja) y ajuste de curva( azul).

Para el procesamiento de los perfiles de tomografía eléctrica se utilizó una versión de prueba del software *Zondres2d*, con el que fueron invertidos y creados los perfiles. Los datos sísmicos fueron capturados con el software *Seismodule Controller* y procesados con *SeisImager*. La construcción de los perfiles eléctricos se realizó con una versión de prueba de *ZondST2D*. Todos los perfiles se editaron utilizando el software *Surfer*.

La interpretación de los datos obtenidos consistió en encontrar discontinuidades en el suelo, estratigrafía, velocidades de propagación de ondas sísmicas. Una vez obtenidas las variables, principalmente la configuración estratigráfica se relacionó con las encontradas en la literatura, para de esta manera conocer lugares susceptibles a presentar discontinuidades.

Adicionalmente se realizaron pruebas de resistividad en laboratorio. Se utilizó material de diferentes tipos presentes en el valle de Aguascalientes como: arenas, gravas, cenizas volcánicas, arcillas y limos, el lugar de obtención de las muestras se puede ver en la Figura 4.1. Se obtuvieron seis tipos de materiales, la caracterización consistió en mediciones de resistividad para cada material con diferentes grados de humedad.

La humedad fue cambiando en función de la cantidad de agua que se mezclaba con la muestra, para esta prueba fue realizada con agua destilada. Se realizaron en promedio 4 mediciones por muestra. Estos valores fueron graficados y ajustados a una línea de tendencia para conocer el comportamiento del suelo con diferentes grados de humedad. A partir de los valores máximos y mínimos se obtuvo el rango de resistividades para diferentes materiales en el valle de Aguascalientes.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Región uno

#### 5.1.1 Lugar de medición número 1. Carretera N° 66

Este sitio se localiza sobre la falla Ejido San Ignacio, en el municipio de Aguascalientes las coordenadas del lugar de estudio son (13 774821 E, 2424537 N) (Figura 5.1), en esta área la falla a estudiar se evidencia por una serie de hoyos alineados y por los daños que ha causado en la carretera 66 kilómetro 3. La falla no muestra un escarpe bien definido en la zona de los terrenos baldíos, sin embargo, en el cruce con dicha carretera, la falla muestra un buzamiento hacia el poniente con un escarpe de 5.0 cm (Figura 5.2). Los modelos resultantes de los levantamientos geofísicos se presentan en la Figura 5.3 para tomografía eléctrica, Figura 5.4 para refracción sísmica; adicionalmente, la Figura 5.5 muestra el trazo de las domocronas y el procesamiento de las mismas, la Figura 5.6 muestra los gráficos de *MASW ID*.

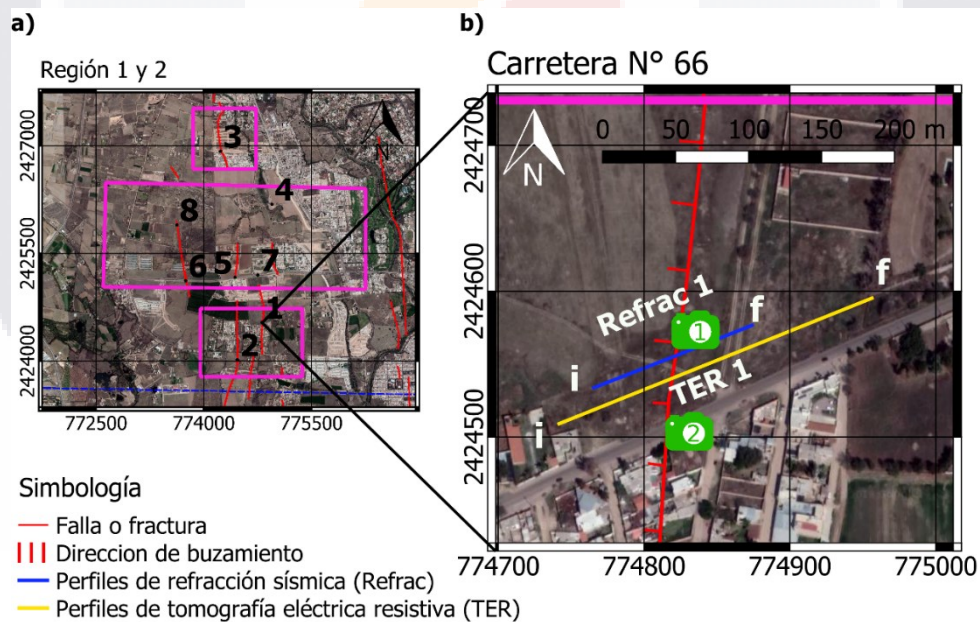


Figura 5.1 Sitio de estudio 1. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.2.

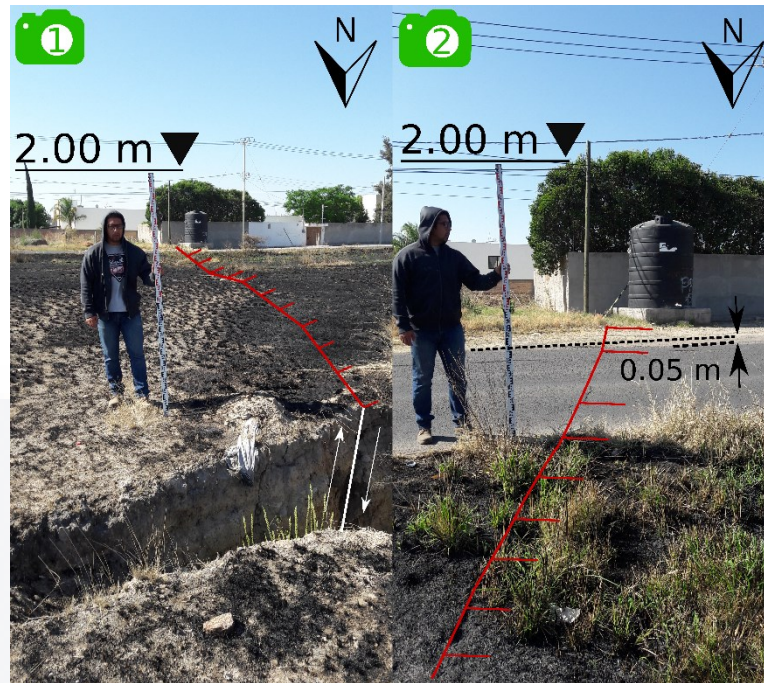


Figura 5.2 Imágenes del sitio 1, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.1. 1) Muestra la falla junto a una excavación en donde es posible observar la discontinuidad dentro de ella. 2) Muestra escarpe creado en la carretera.

La Figura 5.3 muestra el perfil de tomografía eléctrica. En este sitio la falla se localiza aproximadamente a 90 metros de distancia desde el origen. El perfil muestra dos tipos de materiales: sueltos o finos (0 a 30 ohm-metro) y gruesos o compactos (mayores a 30 ohm-metro). Los materiales finos o sueltos están relacionados con los colores azules y verdes, los materiales gruesos o compactos están relacionados con los tonos rosas y rojos. Es importante mencionar que el perfil de tomografía eléctrica muestra configuraciones estratigráficas y estas pueden variar en función de su humedad, así que un material que tiene bajas resistividades y es asociado a materiales finos o sueltos también puede estar asociado a materiales húmedos.

A una profundidad de 20 metros y una distancia de 80 metros de su inicio, se puede observar que el estrato amarillo y estratos subyacentes presentan un desfase horizontal, que también puede ser visto en los estratos de colores azules, producto de la configuración de los estratos más profundos.



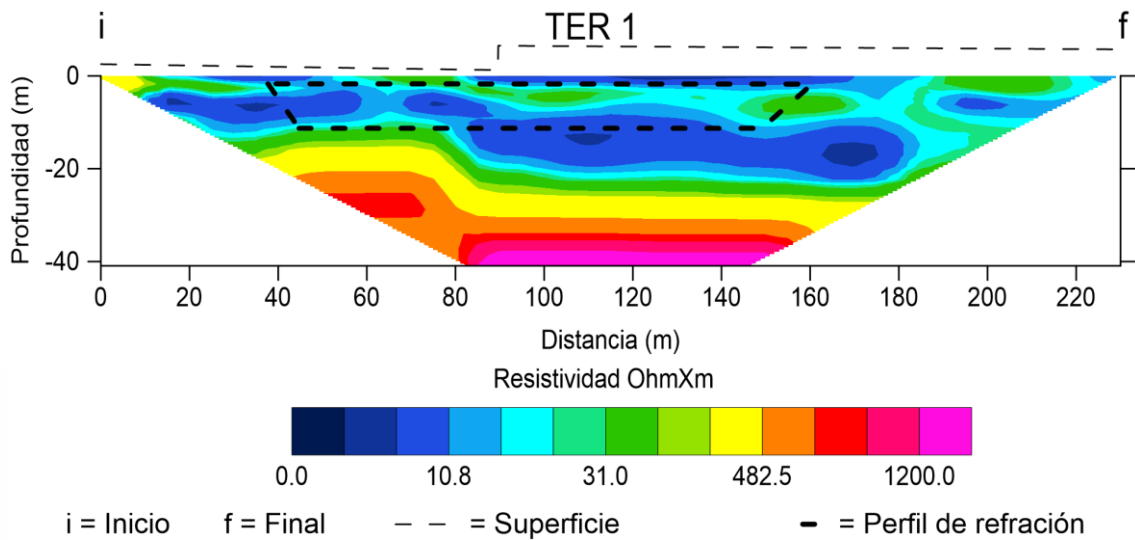


Figura 5.3 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 1. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.1. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 1 (Figura 5.4).

La Figura 5.4 muestra el perfil de refracción sísmica, en el cual se puede observar como las velocidades aumentan en función de la profundidad. También se observan zonas de baja velocidad en tonos azules. La falla superficial se ubica en la zona azul fuerte, esta anomalía podría estar asociada a la fractura ya que se encuentran en el mismo sitio.

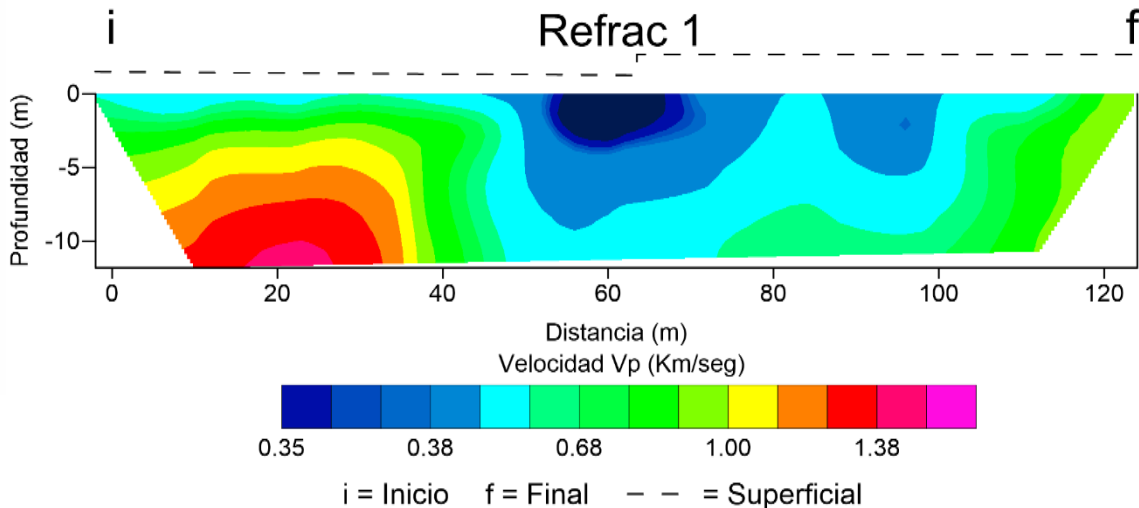


Figura 5.4 Perfil de refracción sísmica del sitio 1. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.1. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

La Figura 5.5-a muestra las domocronas con que fue construido el perfil de refracción sísmica. Las pendientes mostradas en los primeros 40 metros se comportan de manera normal debido a que las pendientes de las domocronas siempre tienden a disminuir. A partir de los 40 metros, se observa como las pendientes de las domocronas aumentan en varias zonas, este comportamiento se considera anormal ya que las pendientes no deben aumentar de acuerdo al método de refracción sísmica. La Figura 5.5-b muestra la zona donde la velocidad disminuye, entre los 50 y 90 metros. La falla se encuentra a 60 metros.

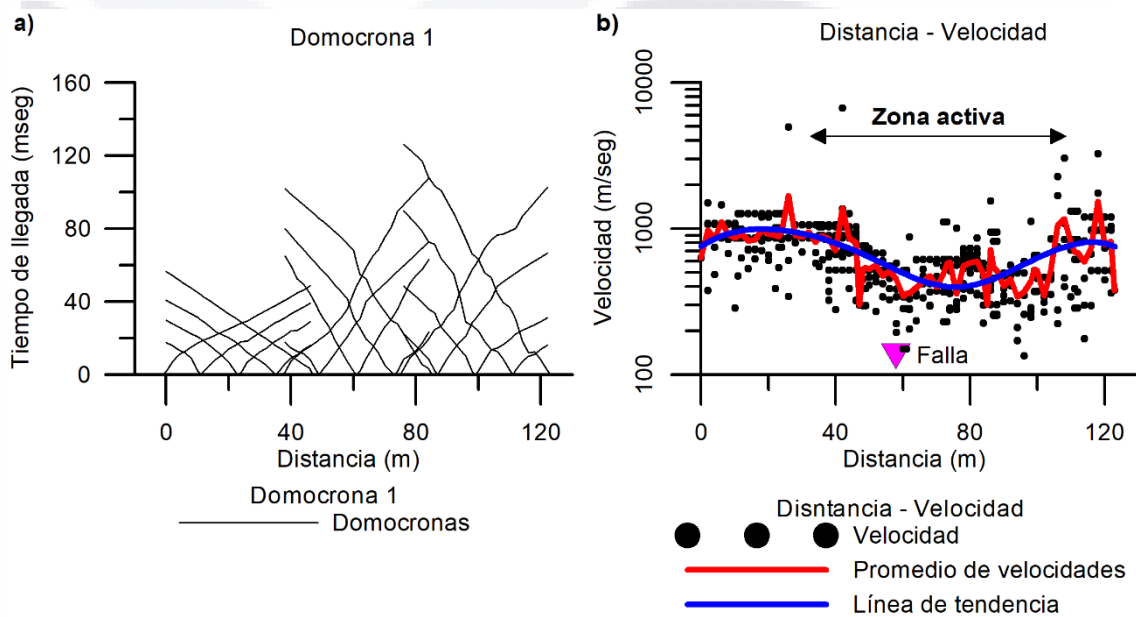


Figura 5.5 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.

La Figura 5.6 muestra las mediciones de MASW 1D, en la línea A las velocidades de ambas mediciones son muy similares lo que indica que no existe una gran variación en los estratos, con variaciones en función de la profundidad. La línea B, las velocidades son similares en ambas mediciones, los valores de las velocidades en estas mediciones no son mayores a 400 m/s, pero de menor velocidad a la de línea A, lo cual indica un posible cambio vertical que podría estar asociado a variaciones en las propiedades del suelo. La línea C, muestra diferentes velocidades en ambas mediciones, la medición realizada en el extremo izquierdo (roja) muestra valores menores que la medición derecha, las velocidades en ellos

tienen magnitudes con una diferencia de aproximadamente 150 m/s, esta variación también indica un cambio en las propiedades de los materiales. En general el rango de velocidades es de 200 a 500 m/s.

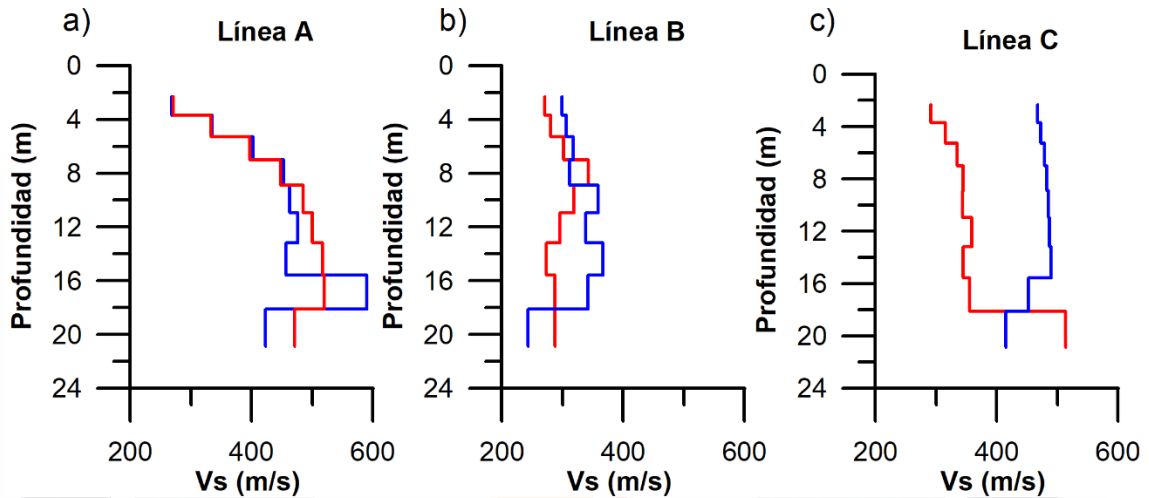


Figura 5.6 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 1. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).

### 5.1.2 Lugar de medición número 2. Carretera N° 66-2

Este sitio se localiza sobre la falla Ex Hacienda San Ignacio, en el municipio de Aguascalientes las coordenadas del sitio de medición son (13 774470 E, 2424017 N) (Figura 5.7). En esta área, la falla se evidencia por un gran escarpe superficial y daños en las construcciones, la falla muestra un buzamiento hacia el oriente y un escarpe de 0.90 m (Figura 5.8). El modelo resultante de tomografía eléctrica se presentan en la Figura 5.9, el de refracción sísmica en la Figura 5.10; adicionalmente, la Figura 5.11 presenta las domocronas y una gráfica de velocidad versus distancia que fueron elaboradas a partir del procesamiento de los datos de refracción sísmica, la Figura 5.12 muestra los gráficos de MASW 1D.

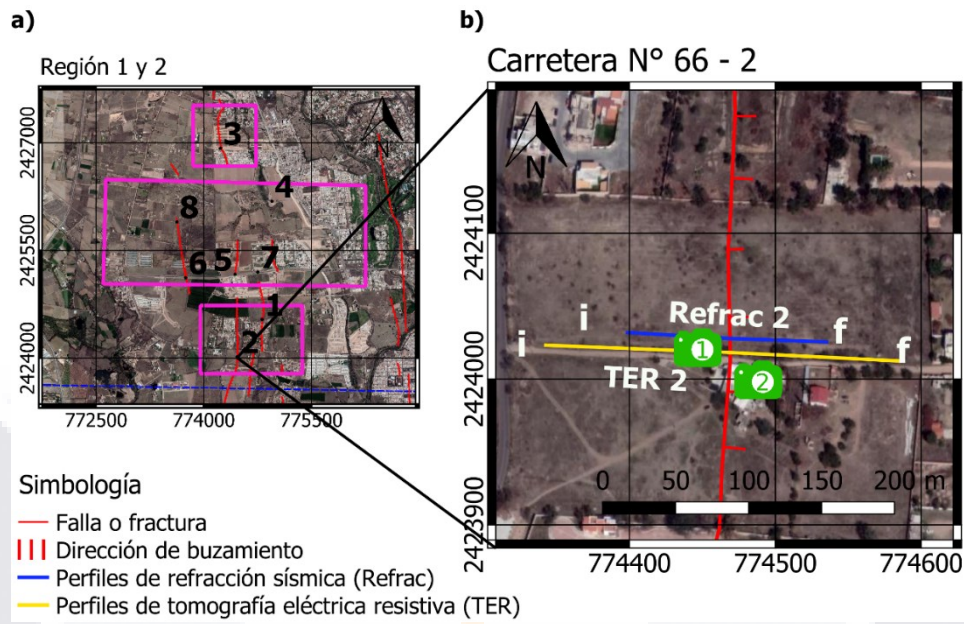


Figura 5.7 Sitio de estudio 2. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.8.



Figura 5.8 Imágenes del sitio 2, la ubicación de las imágenes se observa en la Figura 5.7. 1) Escarpe de 0.90 metros con un buzamiento hacia el oriente. 2) Daños en las construcciones cercanas a la falla.

La Figura 5.9 muestra el perfil de tomografía eléctrica, en este sitio la falla se ubica a 115 metros desde el inicio. El perfil muestra resistividades de 0 a 900 ohm-metro. Estas resistividades se clasifican en dos tipos de materiales al igual que el lugar 1; de 0 a 30 ohm-metro para materiales finos o sueltos y mayores de 30 ohm-metro para materiales compactos o gruesos. Se observa como el espesor de materiales sueltos, después de 140 metros del límite izquierdo (lado poniente) aumenta hasta aproximadamente 25 metros, mientras que de 0 a 140 metros el espesor es de aproximadamente 10 metro; además, se puede observar un estrato de mayor resistividad a una profundidad de 15 metros, estas resistividades podrían estar asociada a materiales con un valor de consolidación mayor.

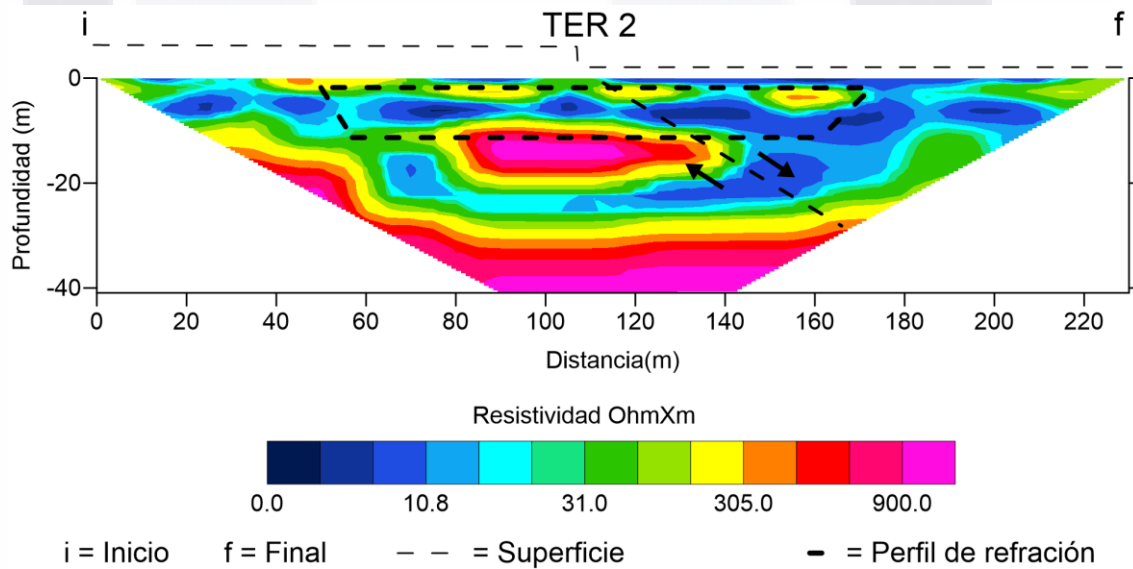


Figura 5.9 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 2. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.7. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 2 (Figura 5.10).

La Figura 5.10 muestra el perfil de refracción sísmica en el sitio dos. La falla se ubica a 60 metros desde el inicio. En este perfil se muestra un comportamiento de aumento de velocidad en la onda P en función de la profundidad, a excepción de una zona ubicada en el centro del perfil (color azul). Esta zona presenta una pérdida de velocidad mostrada con tonos azules, está perdida de velocidad está asociada la discontinuidad presente en la zona.

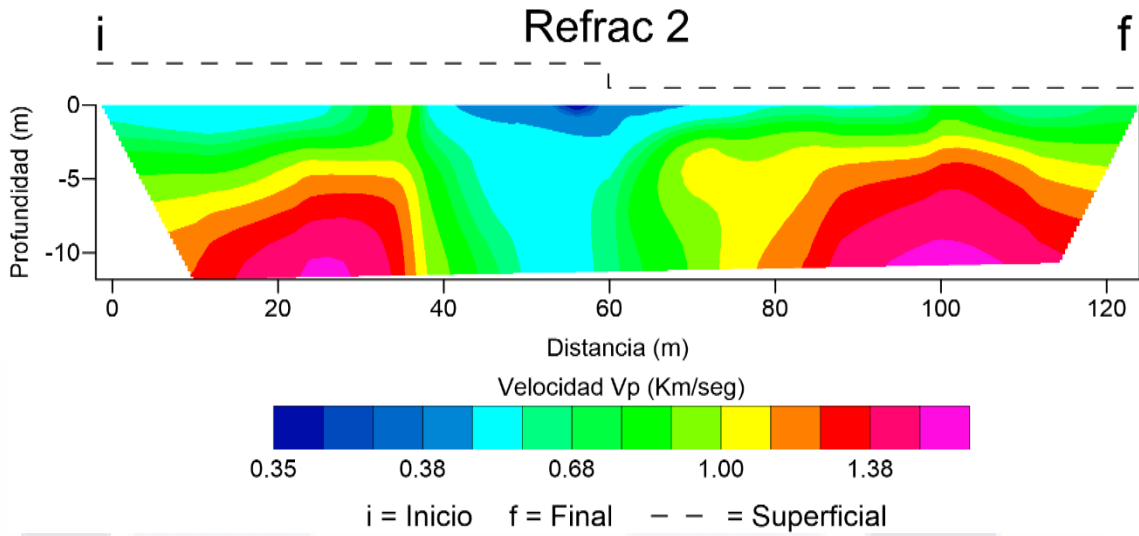


Figura 5.10 Perfil de refracción sísmica del sitio 2. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.7. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe en la superficie.

La Figura 5.11-a muestra las domocronas con que fue construido el perfil de refracción sísmica. Se puede observar que las pendientes aumentan entre los 40 y 80 metros, este comportamiento se considera anormal. La Figura 5.11-b muestra las velocidades medias de las domocronas donde se puede ver que aproximadamente a 60 metros las velocidades son menores. La falla se encuentra a 60 metros desde el origen.

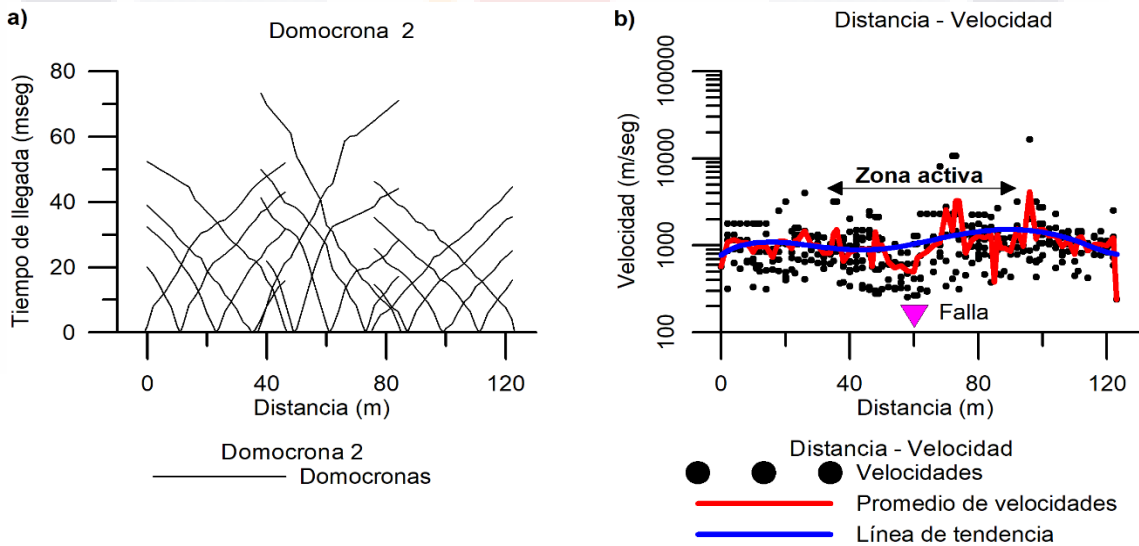


Figura 5.11 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.

La Figura 5.12 muestra que las velocidades son muy similares en cada una de las líneas. Las velocidades varían de 300 a 700 m/s. No es posible identificar cambios significativos en el material. En general el rango de velocidades es de 200 a 600 m/s.

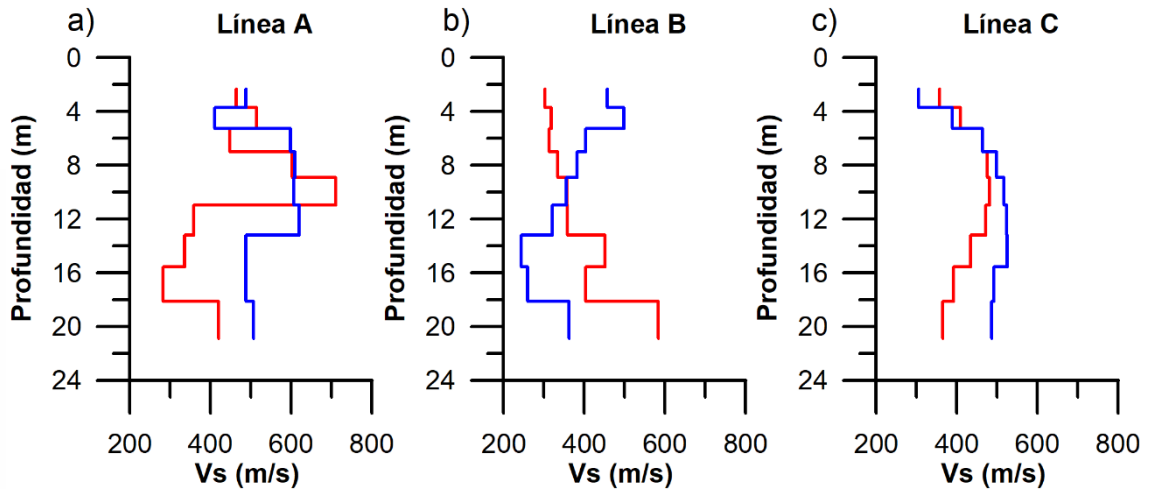


Figura 5.12 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 2 a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).

### 5.1.3 Lugar de medición número 3. Frente a “Q campestre”

Este sitio se localiza sobre la falla Pocitos, frente al fraccionamiento “Q campestre”, en el municipio de Aguascalientes. Las coordenadas del lugar son (13 774227 E, 2426925 N) (Figura 5.13). La falla presenta un escarpe poco definido, a pesar de eso pueden observar daños pequeños en el pavimento, la falla tiene buzamiento hacia el oriente. En la zona se puede observar que existen fracturas que fueron rellenas con caliche (Figura 5.14). Los modelos resultantes de los levantamientos geofísicos se presentan en la Figura 5.15 para tomografía eléctrica, Figura 5.16 para refracción sísmica; adicionalmente, la Figura 5.17 muestra el trazo de las domocronas y el procesamiento de las mismas, la Figura 5.18 muestra los gráficos *MASW 1D*.

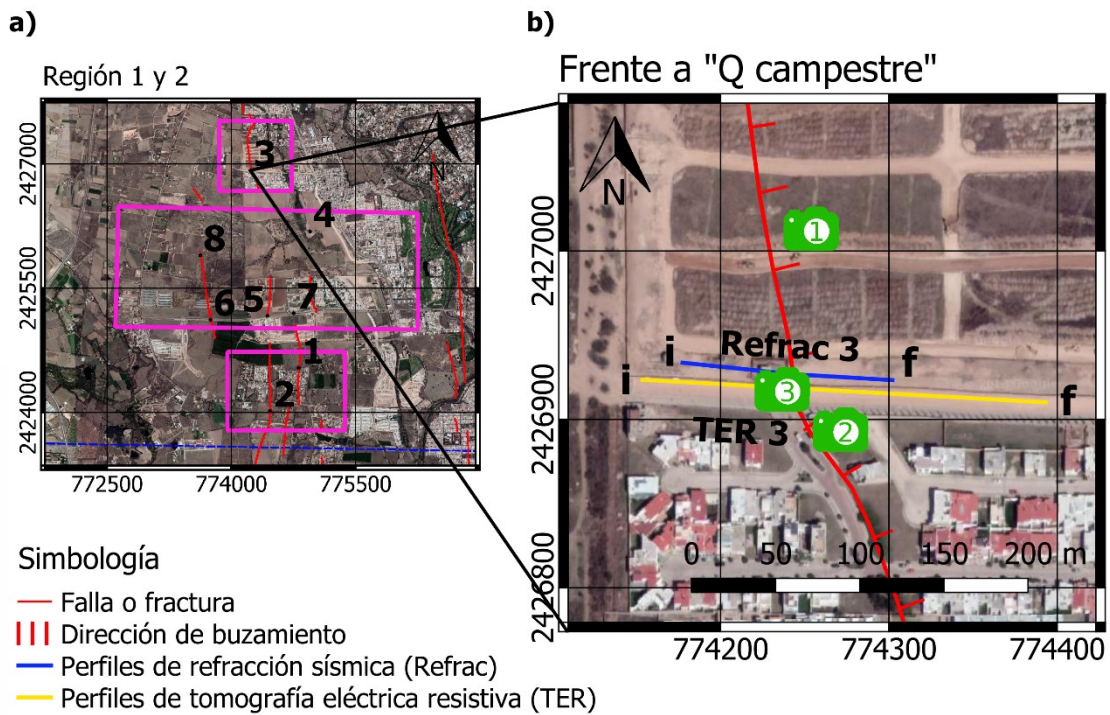


Figura 5.13 Sitio de estudio 3. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.14.





Figura 5.14 Imágenes del sitio 3, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.13. 1) Muestra una grieta en el suelo 2) daños en la infraestructura 3) Estratos rellenos con caliche.

La Figura 5.15 muestra el perfil de tomografía eléctrica del lugar 3. En este sitio la falla se localiza a 90 metros desde el extremo izquierdo. En el perfil se observa un estrato de materiales blandos, con un espesor promedio de 20 metros a todo lo largo del perfil, este estrato se muestra en colores azules-verdes. Después del estrato de materiales blando, se nota un material de mayor resistividad, el cual tiene una discontinuidad a 160 metros desde el

inicio. En el centro del perfil a una profundidad de aproximadamente 10 metros, se muestra una zona de resistividades altas, esta zona es ocasionada por la fractura.

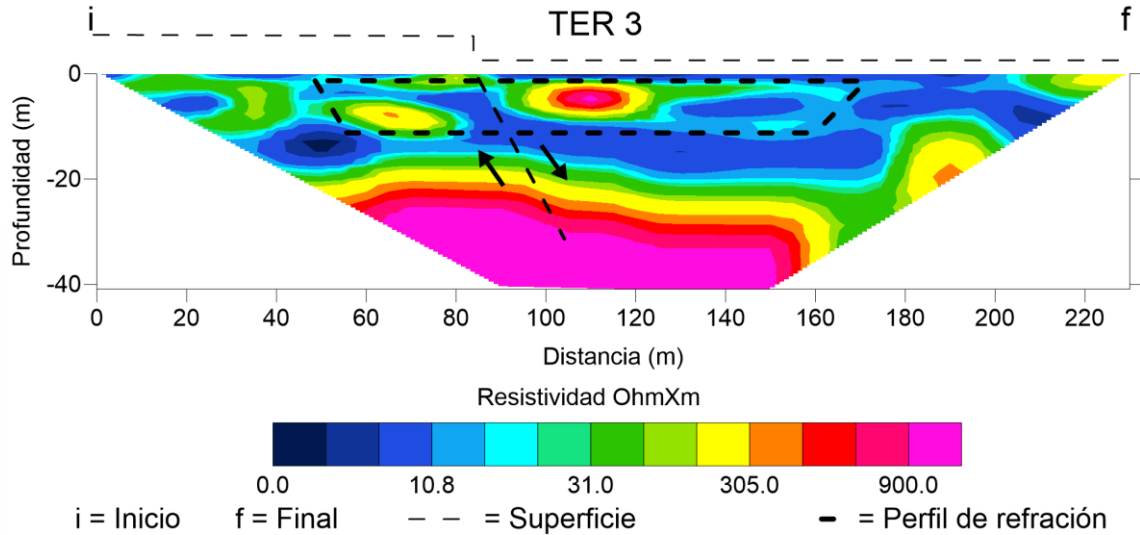


Figura 5.15 Perfil de tomografía eléctrica resistiva sitio 3. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.13 La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 3 (Figura 5.16).

El perfil de refracción sísmica (Figura 5.16), muestra una zona de baja velocidad aproximadamente 0.35 km/seg. Esta anomalía se observa únicamente entre los 55 y 75 metros. En las zonas que rodean esta zona anómala, las velocidad se comportan de manera uniforme y llegan hasta 1.40 km/seg.

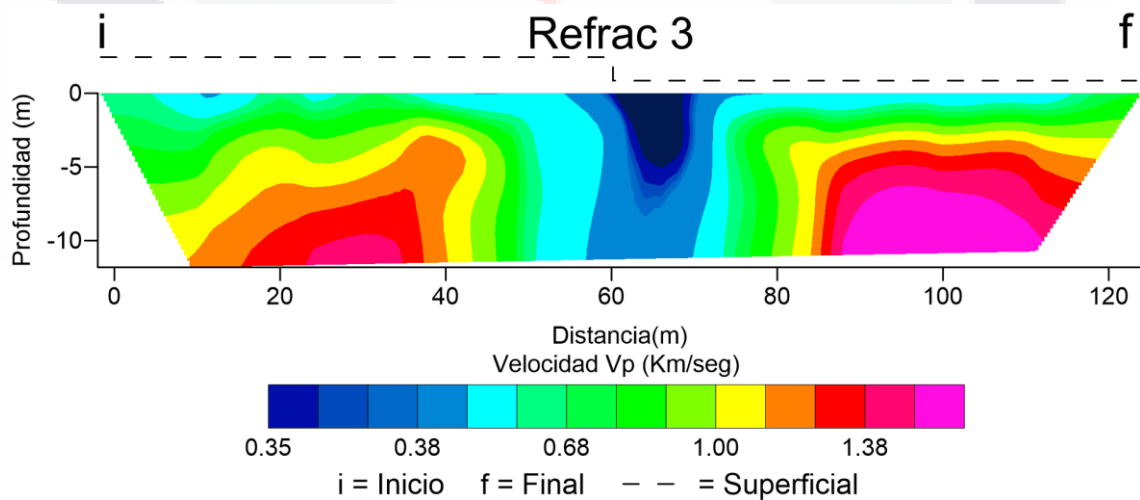


Figura 5.16 Perfil de refracción sísmica, sitio 3. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.13. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe en la superficie.

La Figura 5.17-a muestra las domocronas con que fue construido el perfil de refracción sísmica. Las pendientes entre los 50 y 80 metros se consideran anomalías por el aumento de pendientes que existe. La Figura 5.17-b muestra como las velocidades promedio y la línea de tendencia tiene una disminución de velocidad entre los 40 y 80 metros.

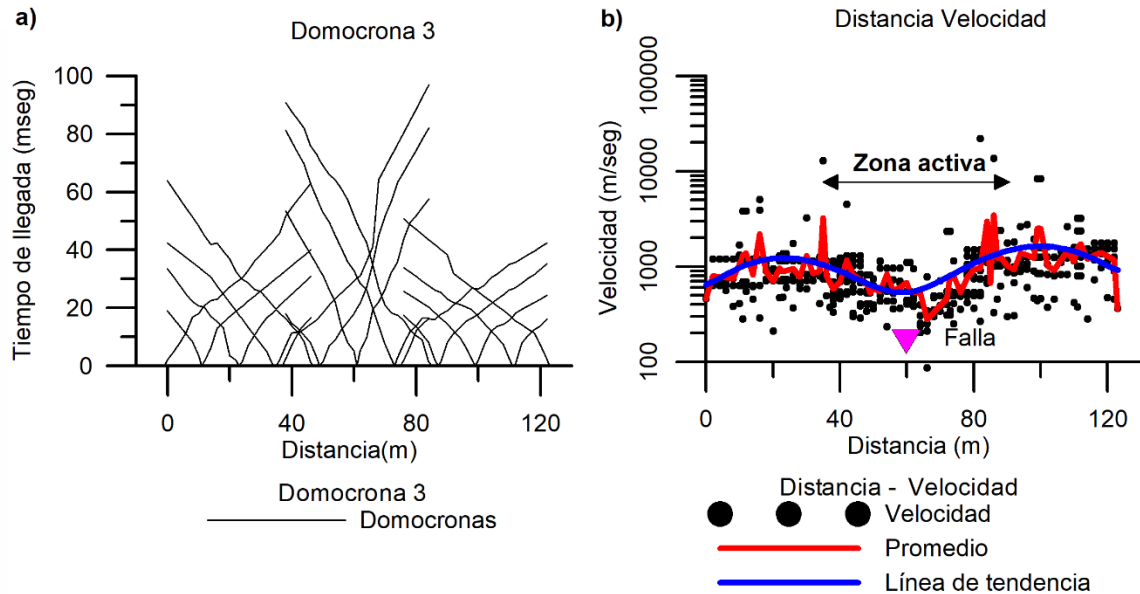


Figura 5.17 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos, para el sitio tres. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.

La Figura 5.18 muestra las mediciones de MASW 1D, en línea A las velocidades son muy similares con una diferencia no mayor a los 100 m/s, esto indica que no existe una variación vertical en las propiedades mecánicas del suelo, para comprobar esto se muestra la medición izquierda de la línea B en color rojo la cual tiene un rango de velocidad muy similar a la línea A, con un rango entre 300 y 400 m/s, sin embargo, la medición derecha de la línea B en color azul, muestra un rango de velocidades mayor de hasta 500 m/s acompañado esto la línea C muestra rangos similares de velocidades de hasta 500 m/s. Esto no indica la existencia de variaciones verticales en las propiedades del suelo.

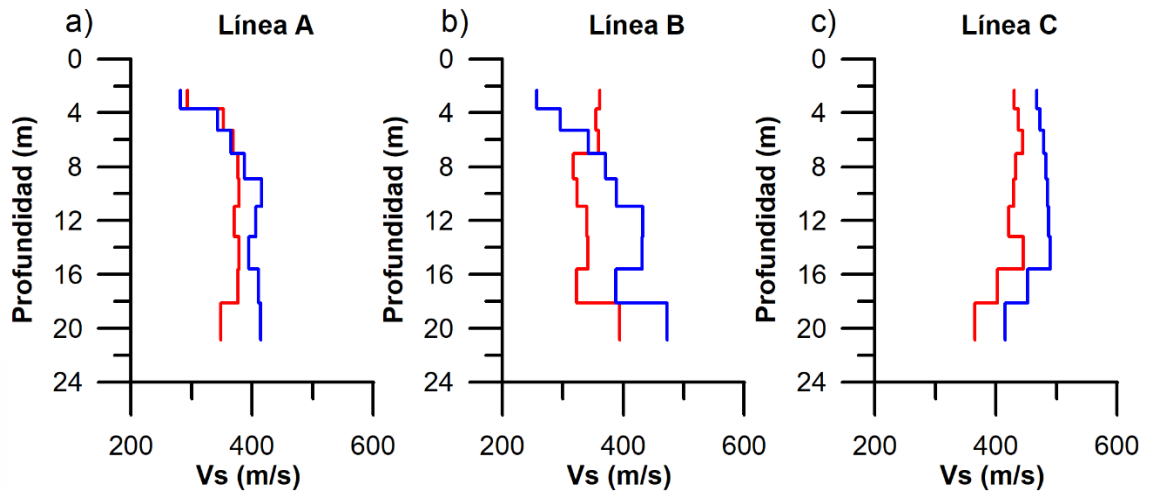


Figura 5.18 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 3. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).

## 5.2 Región dos

### 5.2.1 Lugar de medición número 4. Atrás de “Q campestre”

Este sitio se localiza al final norte de la falla Pocitos, atrás de fraccionamiento “Q campestre” en el municipio de Aguascalientes las coordenadas son (13 775010 E, 2426153 N) (Figura 5.19), en este área la falla no está cartografiada, se realizaron las mediciones al frente del final de la falla Reserva Residencial (Figura 5.20). Los modelos resultantes de los levantamientos geofísicos se presentan en la Figura 5.21 para tomografía eléctrica, Figura 5.22 para refracción sísmica; adicionalmente, la Figura 5.23 muestra el trazo de las domocronas y el procesamiento de las mismas, la Figura 5.24 muestra los gráficos de *MASW 1D*. Aproximadamente a 40 metros desde el inicio del perfil de tomografía eléctrica existe un arroyo en el cual durante el momento de la medición viaja agua.

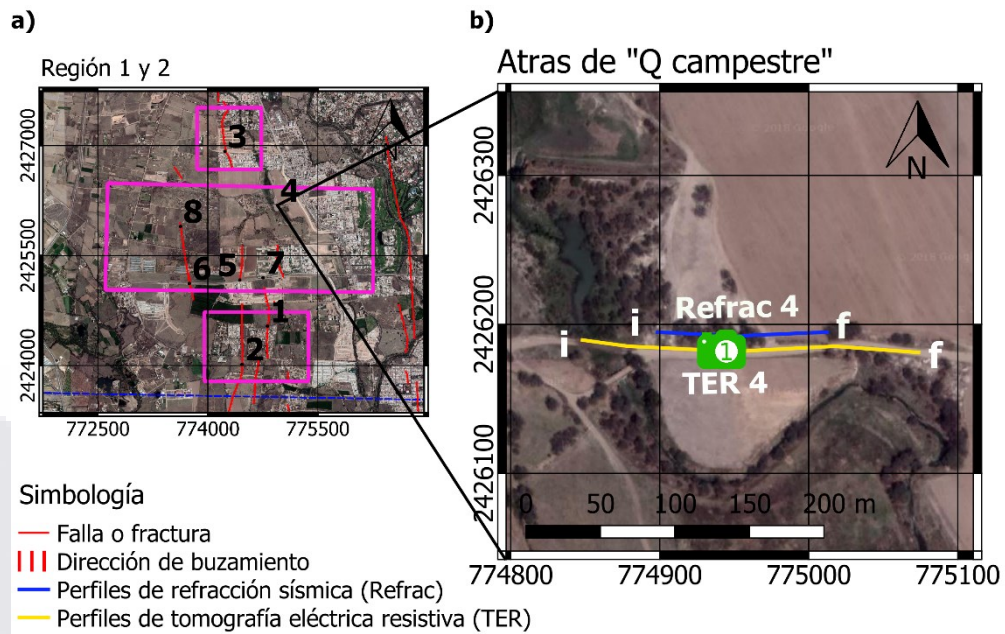


Figura 5.19 Sitio de estudio 4. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de la imagen mostrada en la Figura 5.20.

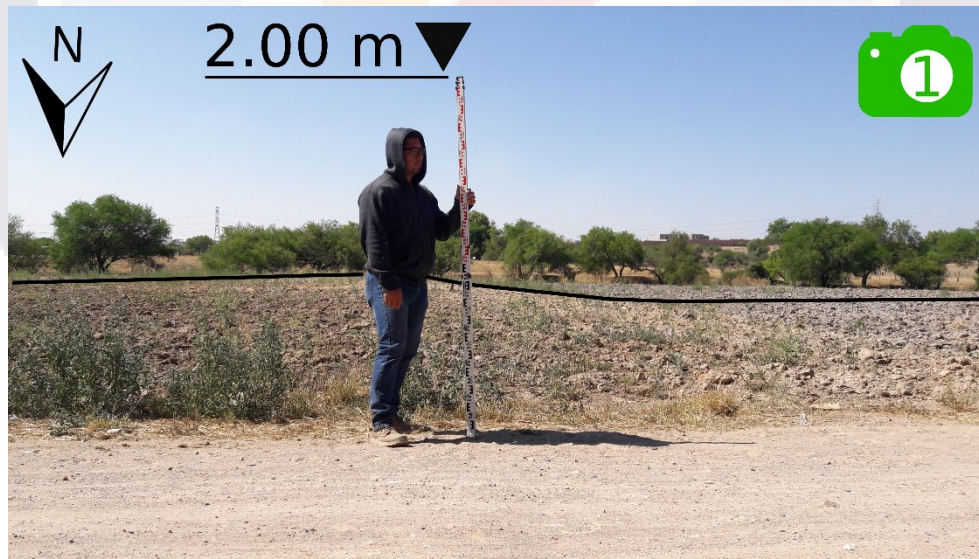


Figura 5.20 Imagen del sitio 4, la ubicación de la imagen se muestra en la Figura 5.19. 1) el lugar en donde no existe una discontinuidad el terreno muestra un escarpe, pero indica que fue realizado con intensiones agrícolas, vista al sur.

La Figura 5.21 muestra el perfil de resistividad eléctrica, en él se muestra en su totalidad materiales de baja resistividad, no mayores a 50 ohm-metro. La presencia de agua podría generar las bajas resistividades de los 40 a 200 metros desde el inicio a una profundidad de 10 metros aproximadamente. El perfil muestra una variación estratigráfica horizontal entre tonos azules y amarillo, esto podría ser producto de estratos intercalados con diferentes capacidades de permeabilidad, que al estar en contacto con el agua del arroyo presentan diferentes valores de resistividad.

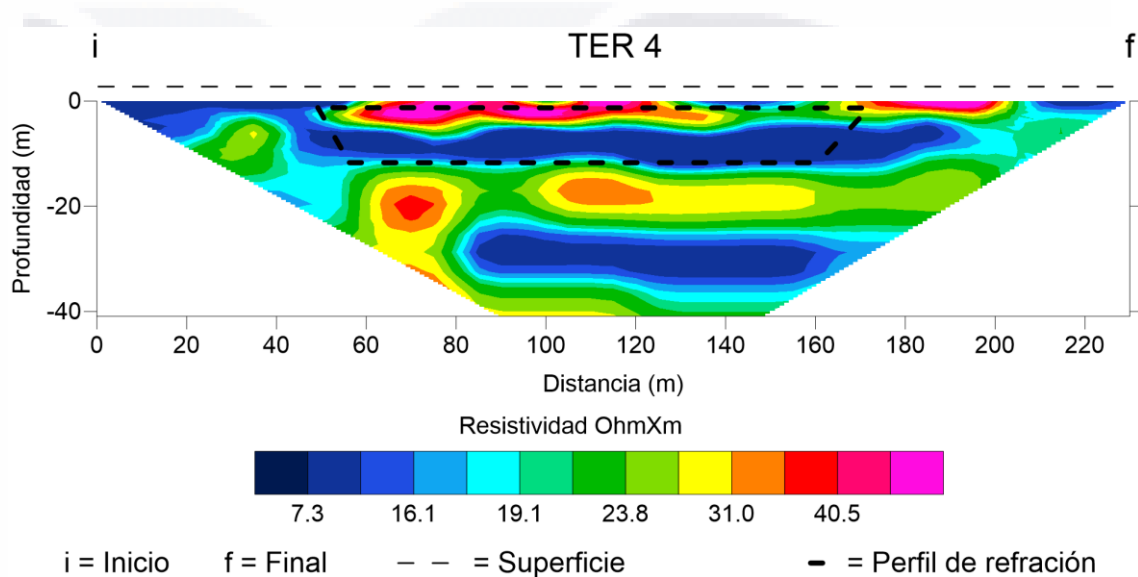


Figura 5.21 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 4 La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.13. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 4 (Figura 5.22).

La Figura 5.22 muestra una zona de baja velocidad de aproximadamente 0.45 km/s, esta zona de baja velocidad se extiende desde los 55 a los 75 metros. Las zonas que se encuentran en los extremos presentan velocidades de hasta 1 km/seg. A pesar de que no se muestra una discontinuidad superficial esta falla está en la proyección de una, lo que podría estar aquí son las pruebas que existe una zona que ha sufrido alteraciones producto de una falla.

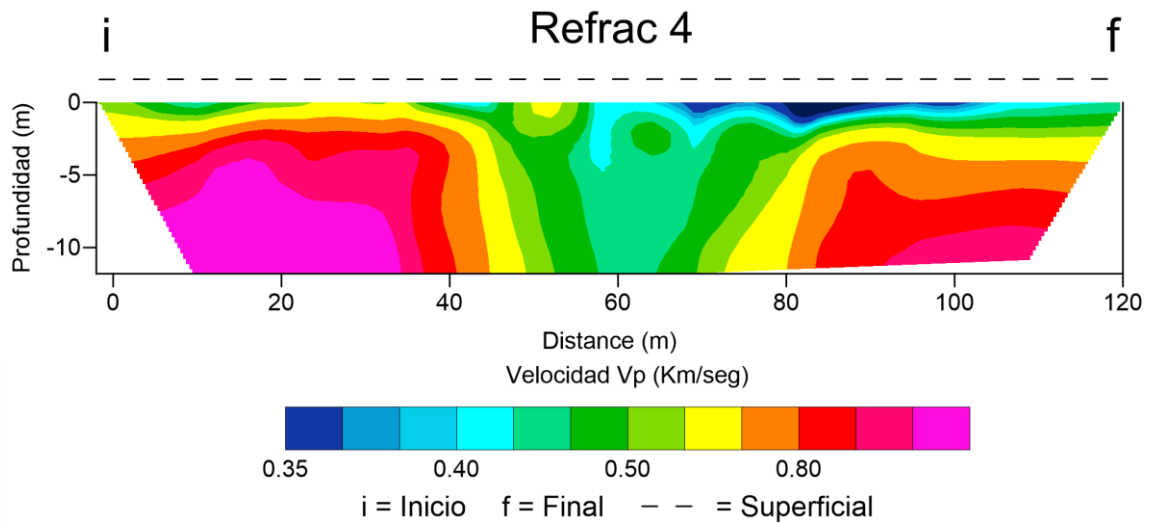


Figura 5.22 Perfil de refracción sísmica del sitio 4. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.19. La línea punteada superior representa la superficie del terreno.

La Figura 5.23-a muestra las domocronas con que fue construido el perfil de refracción sísmica. Las pendientes mostradas entre los 50 y 70 metros desde el origen se comportan de manera anormal, ya que existen pendientes que tienen a aumentar, mientras que en el resto las pendientes siempre son menores en cada cambio. La Figura 5.23-b muestra que la línea de promedio de velocidades y la línea de tendencia se mantiene a lo largo de los tendidos; sin embargo, los puntos negros que representan las velocidades entre cada geófono, si muestran velocidades muy bajas a 50 metros de distancia desde el origen, esto podría ser una prueba de lo que se muestra en el perfil de refracción (Figura 5.23) y como se ve en esta gráfica las bajas velocidades.

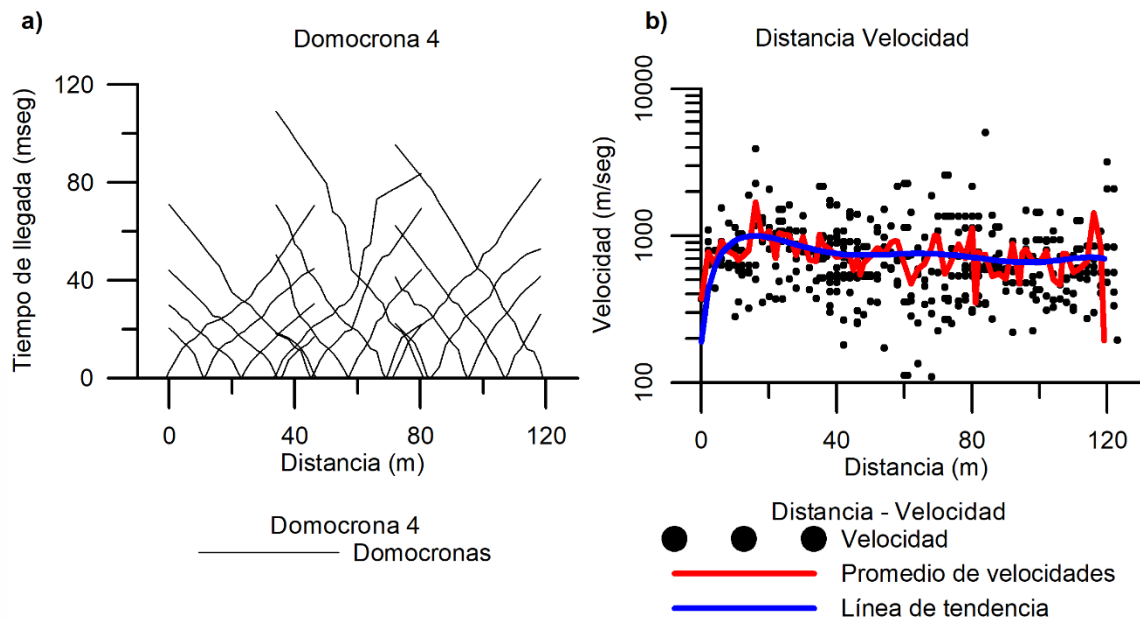


Figura 5.23 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos del sitio 4. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.

Los perfiles de MASW 1D en la Figura 5.24 muestran en las líneas A y B velocidades con comportamiento similar. En la línea C, la velocidad en los primeros 10 metros varían aproximadamente con 150 m/s, a partir de esa profundidad se observa un comportamiento más uniforme. En general el rango de velocidades está entre 250 y 400 m/s.

La Figura 5.24 muestra las mediciones de MASW 1D. En la línea A las velocidades son similares en ambos extremos medidos; sin embargo, la medida en la izquierda (color rojo) tiene valores un poco más altos. En la línea B, los valores son muy similares hasta una profundidad de 8 metros, a partir de ahí la medición izquierda tiene valores de velocidad de hasta casi 100 m/s mayores a la medición derecha. La línea C, muestra valores muy diferentes hasta una profundidad no mayor a 8 metros; esta línea es la que más representa el perfil de refracción sísmica, y donde se muestra una variación vertical en las propiedades de los estratos.



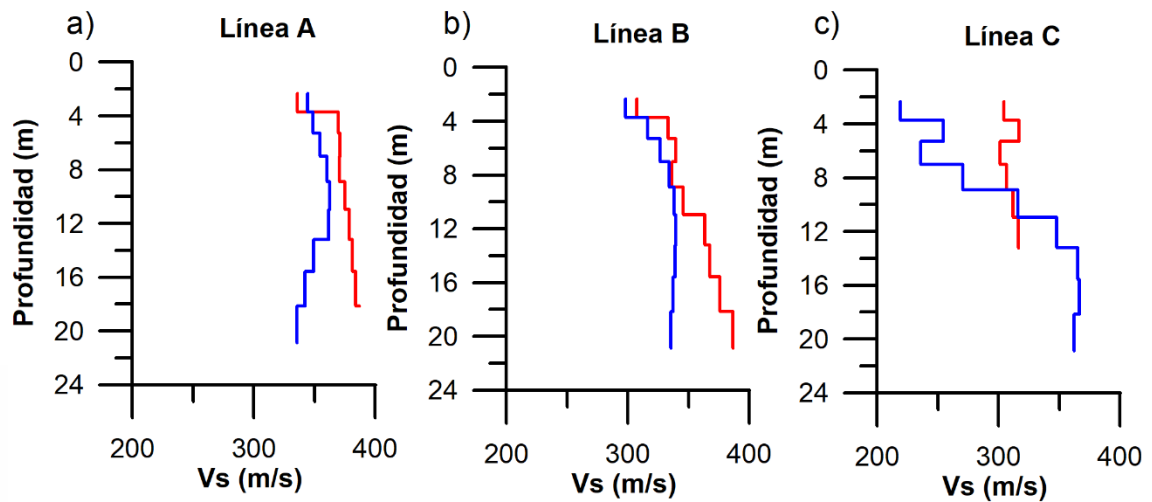


Figura 5.24 Pruebas de MASW 1D, sitio 4 velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 4. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).

### 5.2.2 Lugar de medición número 5. Avenida Guadalupe González

Este sitio se localiza sobre la Avenida Guadalupe González en el municipio de Jesús María, las coordenadas de las mediciones son (13 774423 E, 2425126 N) (Figura 5.25), se encuentra al final de la falla Hacienda San Ignacio y Rancho la estrella 3. La zona no representa una zona clara de falla ya que el asfalto de la zona presenta un gran deterioro en varias zonas, sin embargo es posible observar un buzamiento hacia el poniente con un escarpe de 15 cm (Figura 5.26). Los modelos resultantes de los levantamientos geofísicos se presentan en la Figura 5.27 para tomografía eléctrica, Figura 5.28 para refracción sísmica: adicionalmente, la Figura 5.29 muestra el trazo de las domocronas y el procesamiento de las mismas, la Figura 5.30 muestra los gráficos de *MASW 1D*.

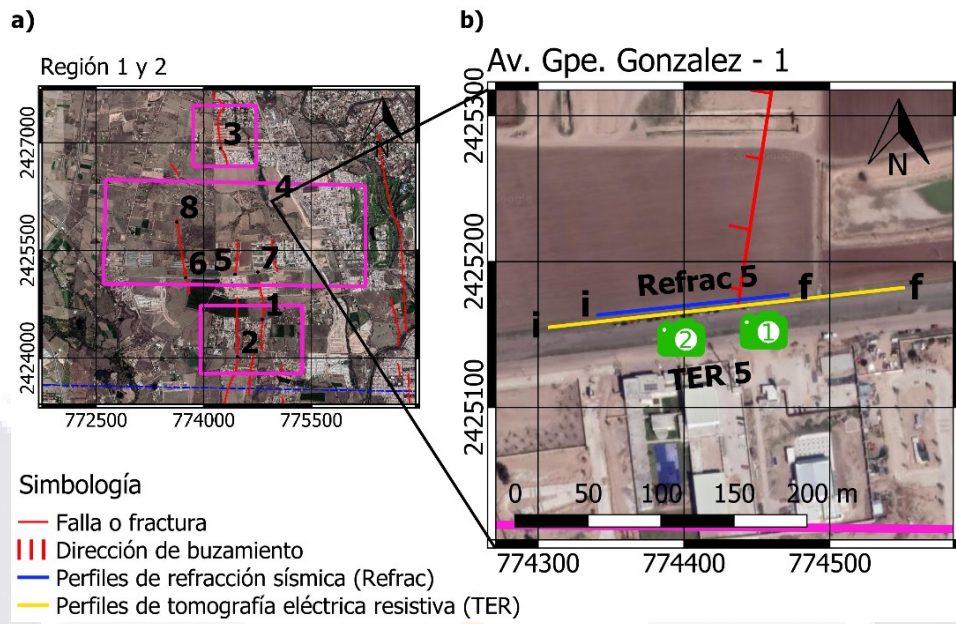


Figura 5.25 Sitio de estudio 5. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.26.

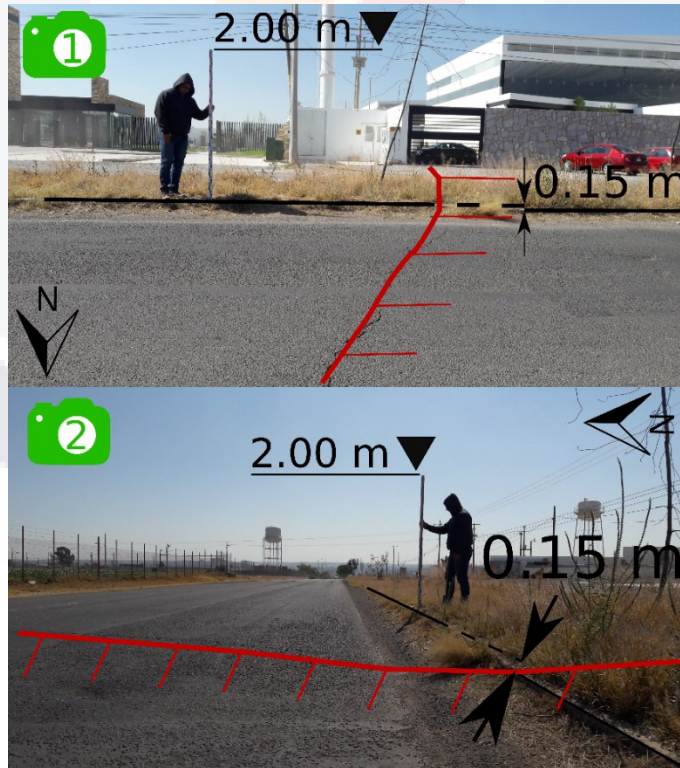


Figura 5.26 Imágenes del sitio 5, la ubicación de las imágenes se observa en la Figura 5.25. 1) Escarpe de 0.15 metros con un buzamiento hacia el poniente. 2) Escarpe de 0.15 metros con un buzamiento hacia el poniente. Las líneas rojas paralelas representan la dirección del bloque hundido.

La Figura 5.27 muestra el perfil de tomografía eléctrica. En este sitio la falla se localiza aproximadamente a 110 metros de distancia desde el origen. El perfil muestra resistividades bajas, no mayores a 25 ohm-metro. En el perfil se observan diferentes tipos anomalías, zona de baja resistividad a 70 metros desde el inicio, resistividades no mayores 8 ohm-metro a una profundidad de 15 metros; a la misma profundidad pero de 100 a 200 metros, se muestran valores de mayor resistividad, aproximadamente 15 ohm-metro. Por las resistividades mostradas lo materiales aquí pueden ser materiales sueltos o finos; también estas zonas de bajas velocidades pueden estar asociadas una filtración de agua, lo que humedece el material y genera estas resistividades.

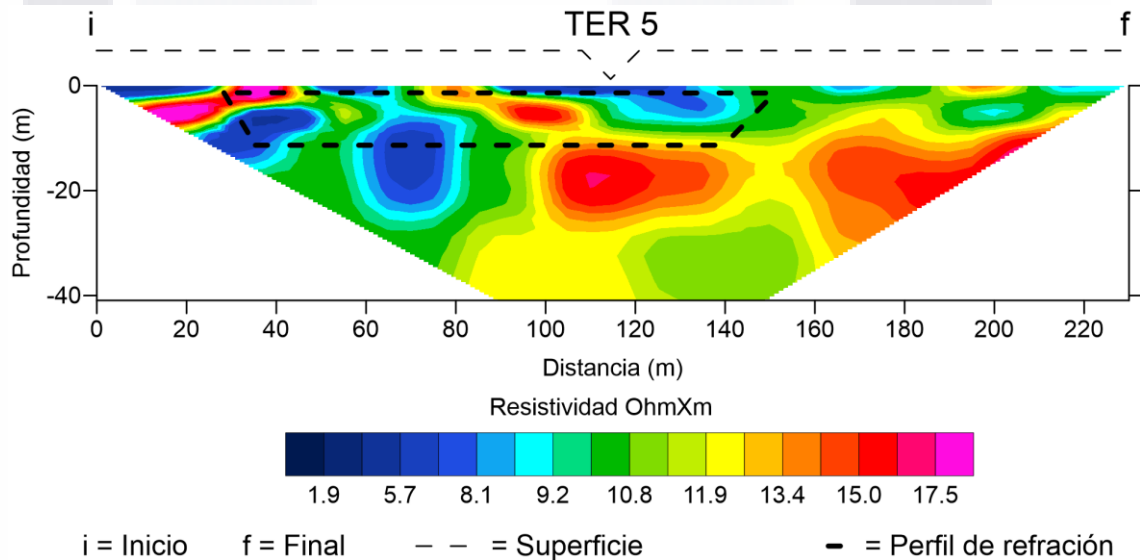


Figura 5.27 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 5. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.26. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 5 (Figura 5.28).

La Figura 5.28 muestra el perfil de refracción sísmica, en el cual se puede mostrar como los primero 50 metros desde el inicio, a partir de una profundidad de 3 metros se puede ver un material con velocidades de hasta 0.90 km/seg. A partir de los 60 metros desde el inicio se observan dos anomalías de baja velocidad, estas anomalías podrían estar asociadas a la zona donde el pavimento presenta mayor deterioro, probablemente por los movimientos generados por la falla.

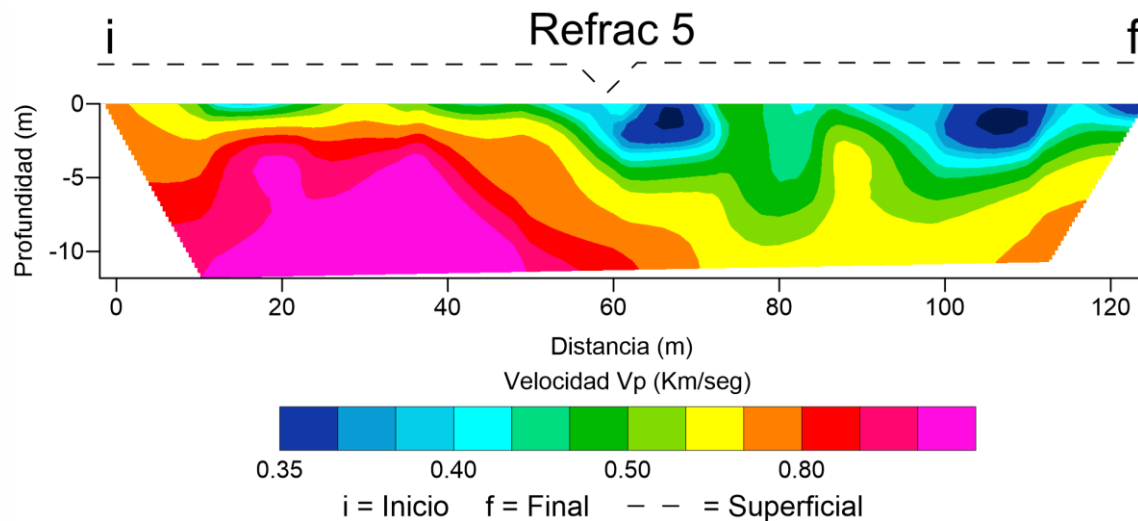


Figura 5.28 Perfil de refracción sísmica del sitio 5. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.25. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

La Figura 5.29-a muestra las domocronas con que fue construido el perfil de refracción sísmica. Las pendientes mostradas sugieren anomalías en los estratos a lo largo del perfil. La Figura 5.29-b como al centro la línea de tendencia, muestra valores bajos de velocidad entre los 40 y 80 metro, justo donde fue posible observar el escarpe.

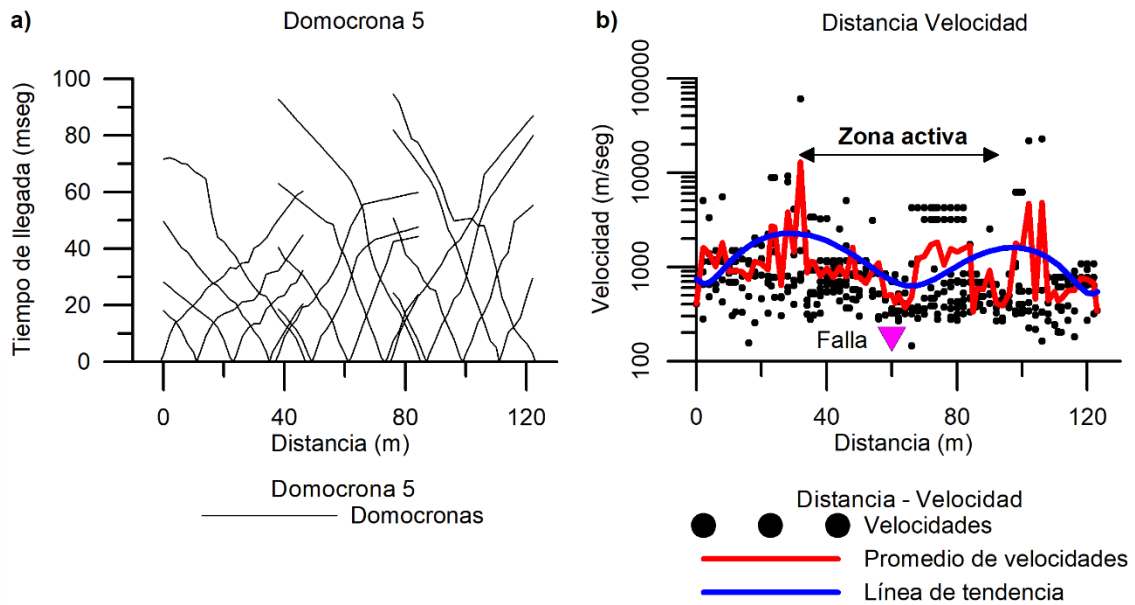


Figura 5.29 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos del sitio 5. a) Domocronas b) Procesamiento de las velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.

La Figura 5.30 muestra en las líneas A y B, comportamientos en ambos tiros de forma similar, con rangos de velocidades de 300 a 400 m/s. En la línea C, a partir de una profundidad de 8 metros existe una variación de aproximadamente 120 m/s, la línea azul la cual fue medida en el extremo oriente del perfil aproximadamente a 120 metros desde el inicio, muestra una mayor velocidad, esto sugiere que a partir de esa distancia los valores continuarían comportándose de manera similar. En general el rango de velocidades esta entre 250 y 500 m/s.

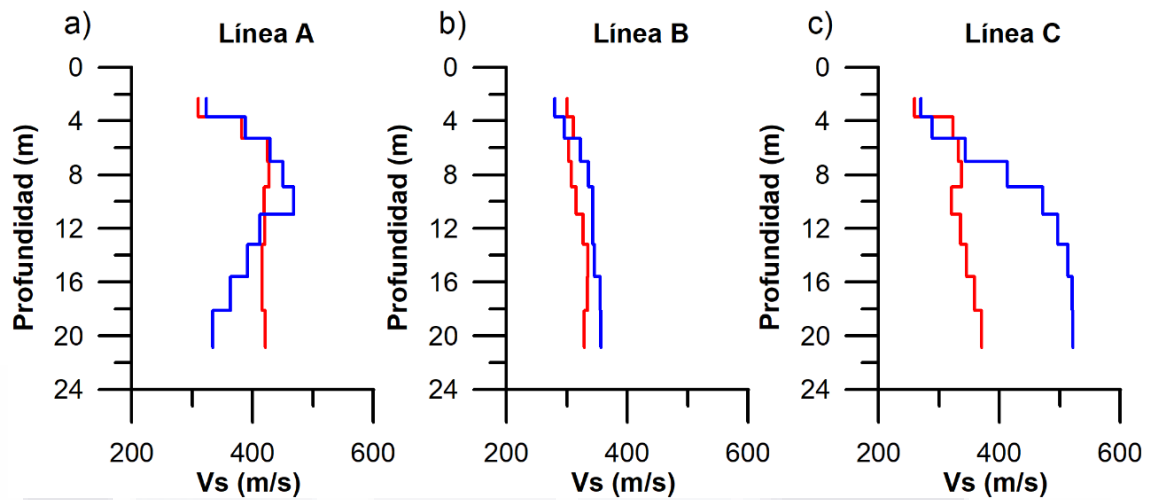


Figura 5.30 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 5 a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).

### 5.2.3 Lugar de medición número 6. Avenida Guadalupe González - 2

Este sitio se localiza sobre la falla Rancho la Estrella 2, en la avenida Guadalupe González en el municipio de Aguascalientes las coordenadas del lugar son (773740 E 2425140 N) (Figura 5.31), en esta área la falla muestra un escarpe bien definido de 0.15 m, con un buzamiento hacia el oriente (Figura 5.32). Los modelos resultantes de los levantamientos geofísicos se presentan en la Figura 5.33 para tomografía eléctrica, Figura 5.34 para refracción sísmica; adicionalmente, la Figura 5.35 muestra el trazo de las domocronas y el procesamiento de las mismas, la Figura 5.36 muestra los gráficos *de MASW 1D*.

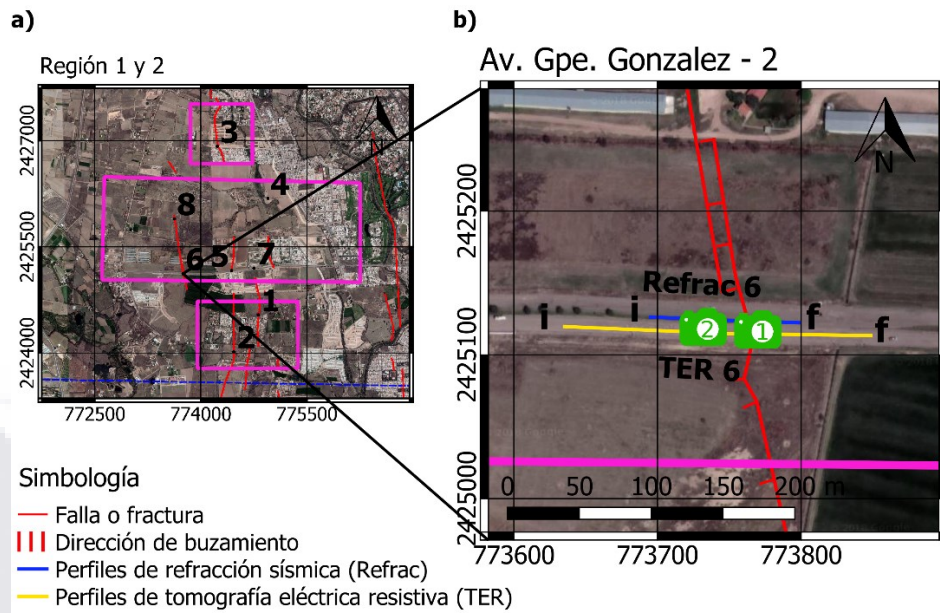


Figura 5.31 Sitio de estudio 6. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.32.

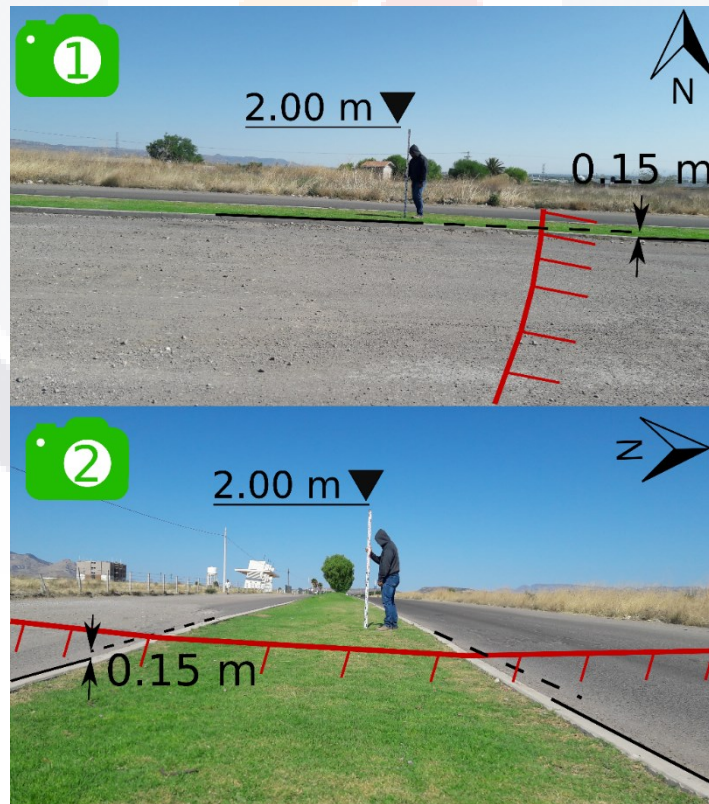


Figura 5.32 Imágenes del sitio 6, las líneas rojas paralelas muestran el buzamiento de la falla y un escarpe de 0.15 metros, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.31. 1) Vista hacia el norte. 2) Vista hacia el poniente.

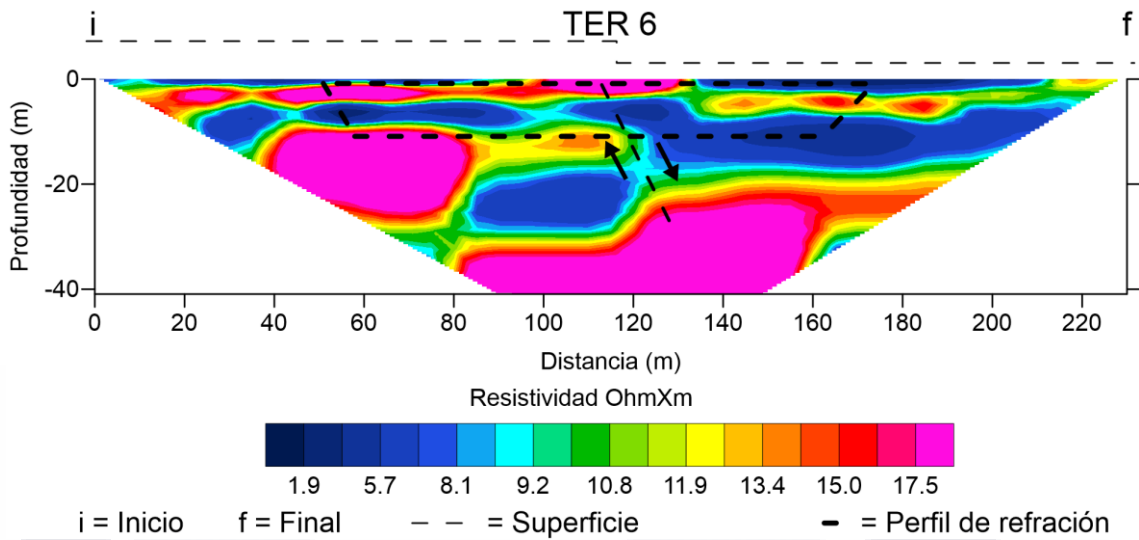


Figura 5.33 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 6. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.32. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe, el recuadro punteado en el perfil señala la ubicación del perfil Refrac 6 (Figura 5.34).

La Figura 5.34 muestra velocidades de 0.4 a 1 m/s. La falla se encuentra a 60 metros. En la zona de la falla es posible observar una zona de baja velocidad en tonos azules. En ambos lados continuos a la falla se observa un aumento en la velocidad conforme la velocidad aumenta.

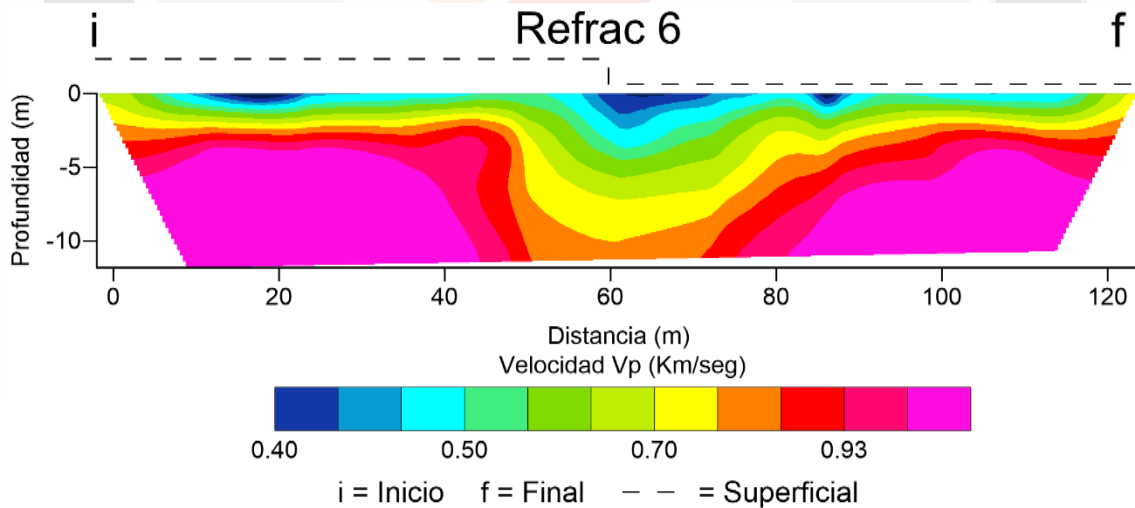


Figura 5.34 Perfil de refracción sísmica del sitio 6. La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.31. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe.



La Figura 5.35-a muestra zona anómala a partir de 45 metros y hasta 70 metros, esta zona anómala producto de las variaciones en las pendientes de las domocronas. La línea de tendencia y puntos de velocidad diferencial, muestran a una distancia de 60 metros como las velocidades bajan en la zona donde se encuentra la falla (Figura 5.35-b).

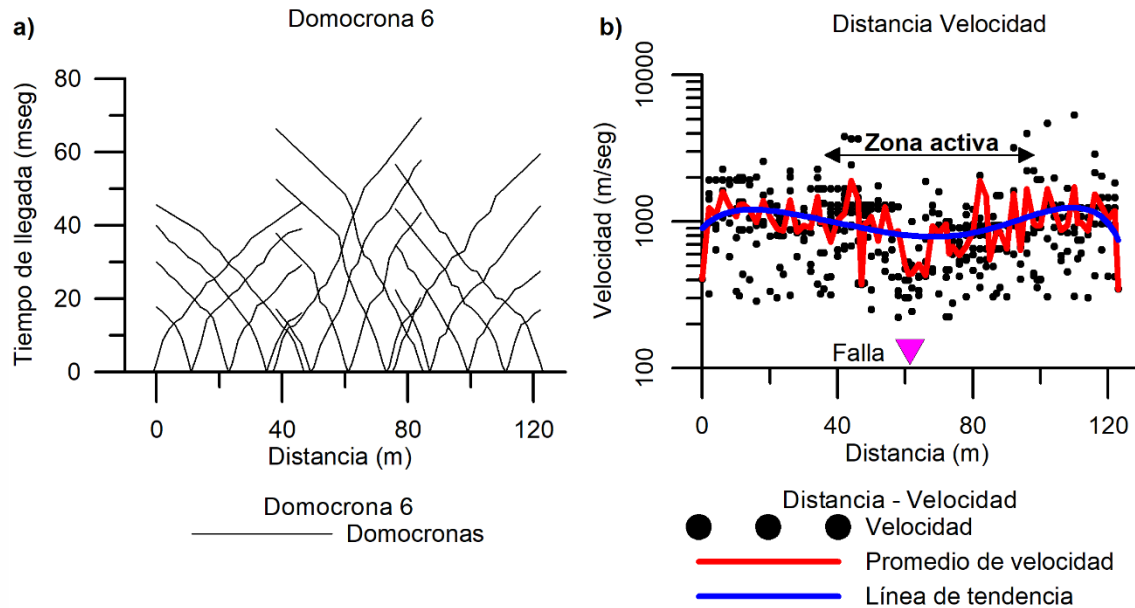


Figura 5.35 Domocronas y procesamiento de los datos sísmicos. a) Domocronas b) Procesamiento de velocidades. Los puntos negros representan los valores de velocidad entre cada geófono, la línea roja es el promedio de las velocidades entre los geófonos y la línea azul representa la línea de tendencia del promedio de velocidades.

La Figura 5.36 muestra las mediciones de MASW 1D. Las líneas A y C, que fueron medidas en los extremos muestran un incremento de velocidad a menor profundidad; a partir de 8 metros de profundidad tienen velocidades de aproximadamente 450 m/s; mientras que la línea B, medida al centro del arreglo a una profundidad de 20 metros únicamente alcanza una velocidad de 400 m/s. Estas mediciones confirman lo mostrado en el perfil de refracción sísmica (Figura 5.34), donde las velocidades de onda son menores al centro del perfil.

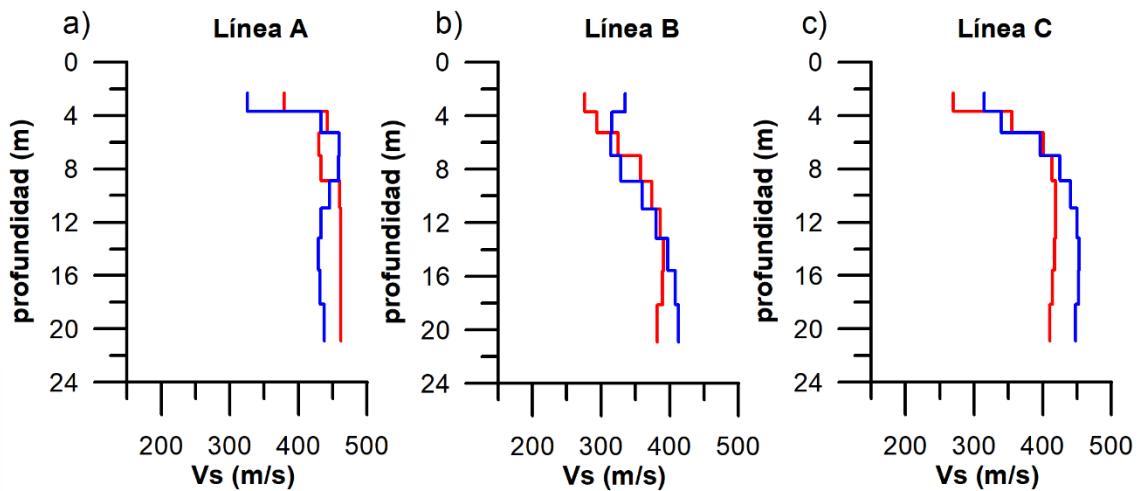


Figura 5.36 Velocidades de onda resultantes mediante la prueba de MASW 1D del sitio 6. a) Mediciones realizadas en la línea A b) Mediciones en la línea B c) Mediciones en la línea C. Las líneas rojas son las mediciones realizadas en el extremo izquierdo mientras que las azules fueron realizadas en el lado derecho de cada línea (Figura 4.2).

#### 5.2.4 Lugar de medición número 7. Av. Gpe. González – 3

Este sitio se localiza al frente de la falla Ejido San Ignacio en la avenida Guadalupe González (Figura 5.37) en esta zona no se encuentran daños en la superficie, esta medición fue realizada sobre la proyección de la falla en el sitio 1; esta medición fue realizada para encontrar o factores que identifique cual es el motivo que le falla no se ha generado en dicho lugar, a pesar que se encuentra en la traza de una falla. La medición fue realizada sobre el camellón el cual presenta vegetación y se realiza periódicamente riego para mantel la vegetación viva. El modelo de la tomografía eléctrica se encuentra en la Figura 5.38.

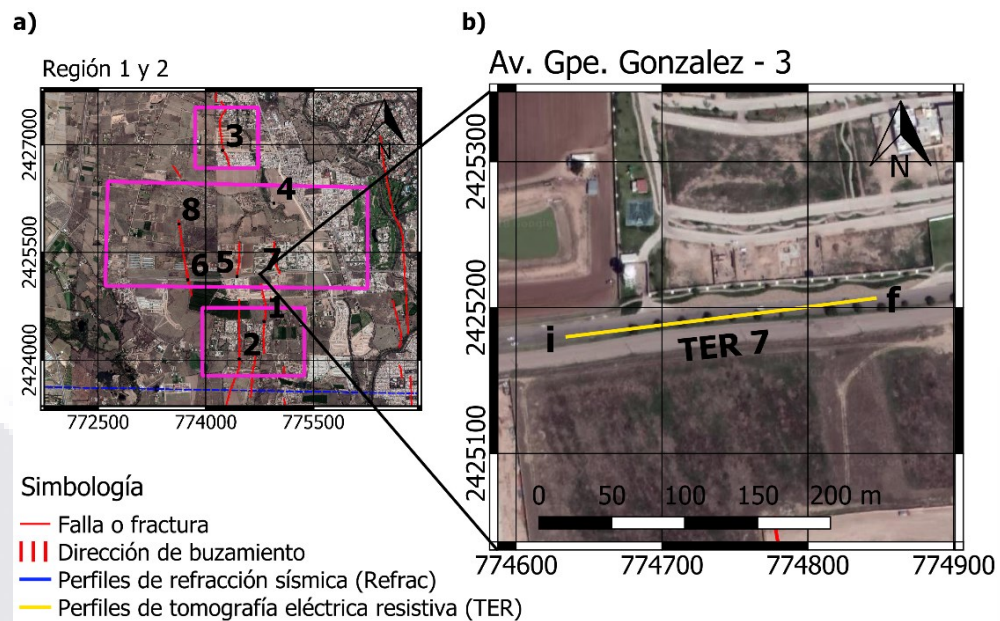


Figura 5.37 Sitio de estudio 7. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica.

La Figura 5.38 muestra el perfil de tomografía eléctrica. El perfil muestra materiales de baja resistividad, no mayores a 20 ohm-m. Es posible observar un acomodo horizontal en la estratigrafía. En los primeros 5 metros existen materiales de baja resistividad, producto de la humedad por la vegetación en la zona. A partir de 5 metros las resistividades aumentan; a partir de 80 metros desde el origen se observa como las resistividades tienen valores de 15 ohm-metro, mientras que de 0 a 80 metros las resistividades son menor. Esto muestra una discontinuidad en los estratos a partir de 5 metros de profundidad.

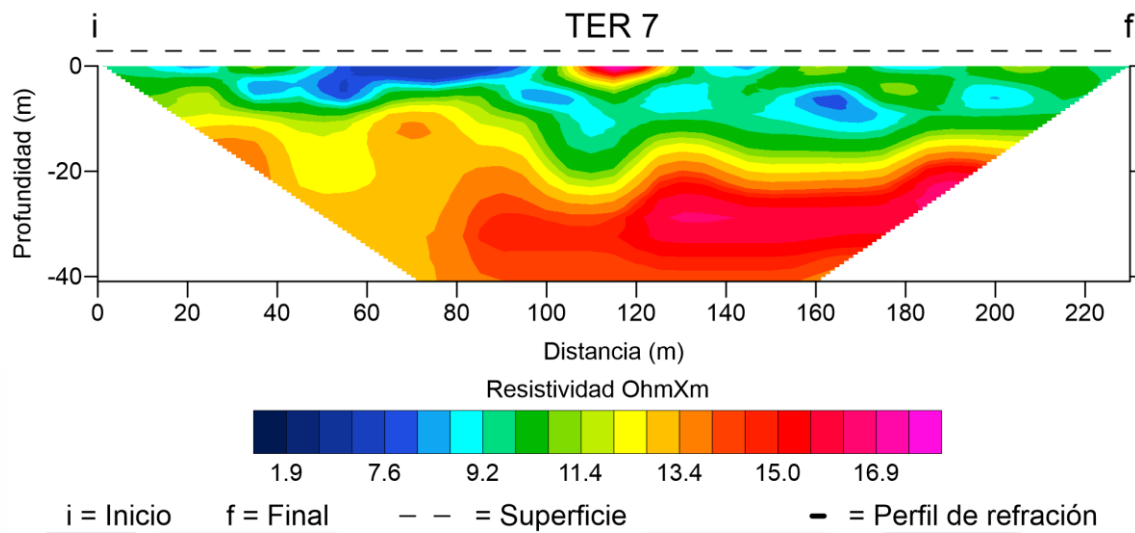


Figura 5.38 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 7 La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.37. La línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

### 5.2.5 Lugar de medición número 8. Las Liebres

Este sitio se localiza al frente de la falla Rancho la Estrella 2 en el municipio de Aguascalientes, las coordenadas del punto son (13 773623 E, 2425896 N) (Figura 5.39) en esta área no se encuentran discontinuidades superficial. Se realizó la medición para encontrar variaciones en la estratigrafía. El modelo resultante de la tomografía eléctrica se muestra en Figura 5.40.

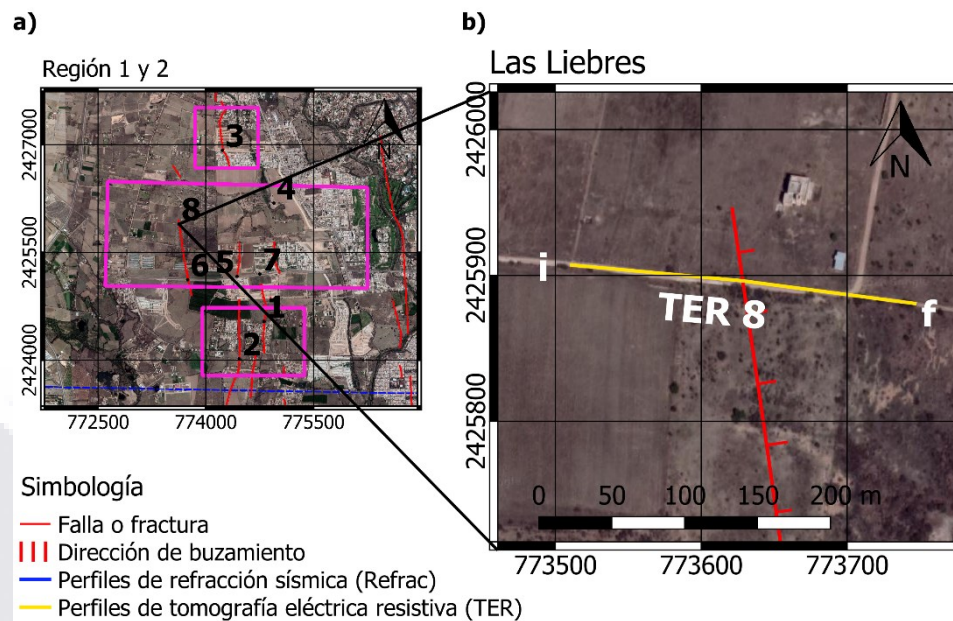


Figura 5.39 Sitio de estudio 8. a) Macrolocalización. Se muestran las regiones uno y dos y los sitios donde se realizaron pruebas b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica.

La Figura 5.40 muestra el perfil de tomografía eléctrica, en el cual el máximo valor de resistividad no es mayor a 20 ohm x metro. El final de la falla se encuentra 115 metros. Los estratos muestran un acomodo horizontal; sin embargo, entre 120 y 160 metros se observa una discontinuidad en el estrato color rosa, esta discontinuidad podría estar asociada a una falla aun no presente en la superficie.

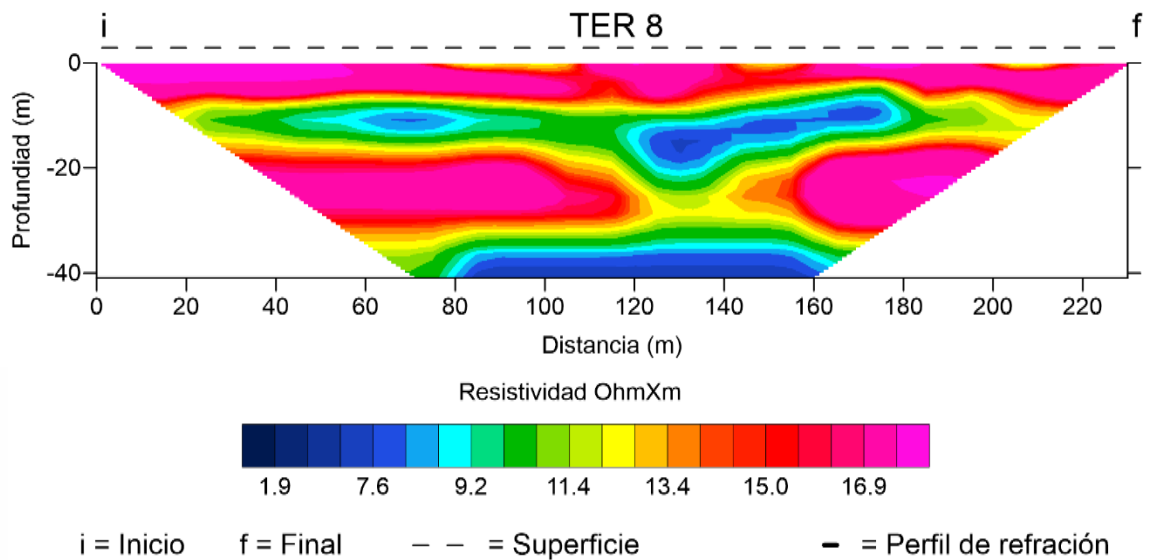


Figura 5.40 Perfil de tomografía eléctrica resistiva del sitio 7 La ubicación y orientación del perfil se muestra en la Figura 5.39.

### 5.3 Región tres

#### 5.3.1 Lugar de medición número 9. La Posta – UAA

Este sitio se en las instalaciones de la UAA, sobre la falla Poniente Jesús María, donde se realizaron tres mediciones. La primera, se realizó donde es posible encontrar una discontinuidad en el terreno superficial, y las dos siguientes fueron levantadas al frente de la anterior continuado el trazo de la falla; sin embargo, en estas zonas no se encontraba una discontinuidad superficial (Figura 5.41), la Figura 5.42 muestra las fallas. Los modelos resultantes de las mediciones se muestran en la Figura 5.43 para la línea A, Figura 5.44 para la línea B y Figura 5.45 para la línea C.

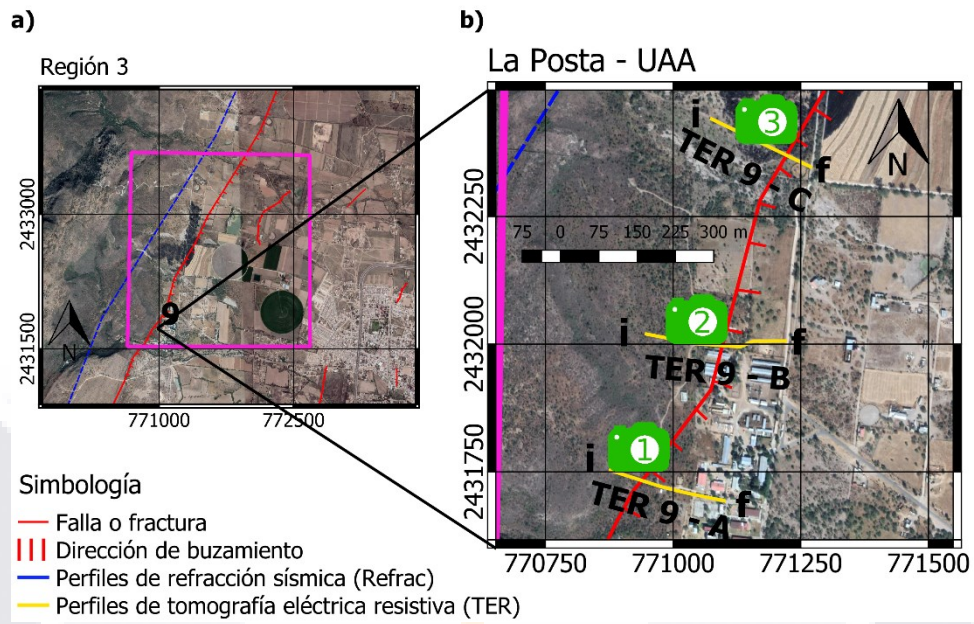


Figura 5.41 Sitio de estudio 9, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.42. a) Macrolocalización. Se muestran la región tres b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica.



Figura 5.42 Imágenes del sitio 9, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.41. 1) Traza de la falla en la línea A 2) Traza de la falla en la línea B 3) Traza de la falla en la línea C.

La Figura 5.43 muestra un perfil de tomografía eléctrica en la línea A. Se observan valores de resistividad de 0 a 1000 ohm x metro. La falla se encuentra aproximadamente a 85 metros desde el inicio, el primer electrodo fue incado sobre el lecho rocoso, donde inicia el valle de Aguascalientes. En el perfil se puede observar dos tipos de materiales: materiales blandos de relleno con una resistividad menor a 30 ohm x metro y materiales con resistividades de hasta 900 ohm x metro, asociados al lecho rocoso presente en la zona.

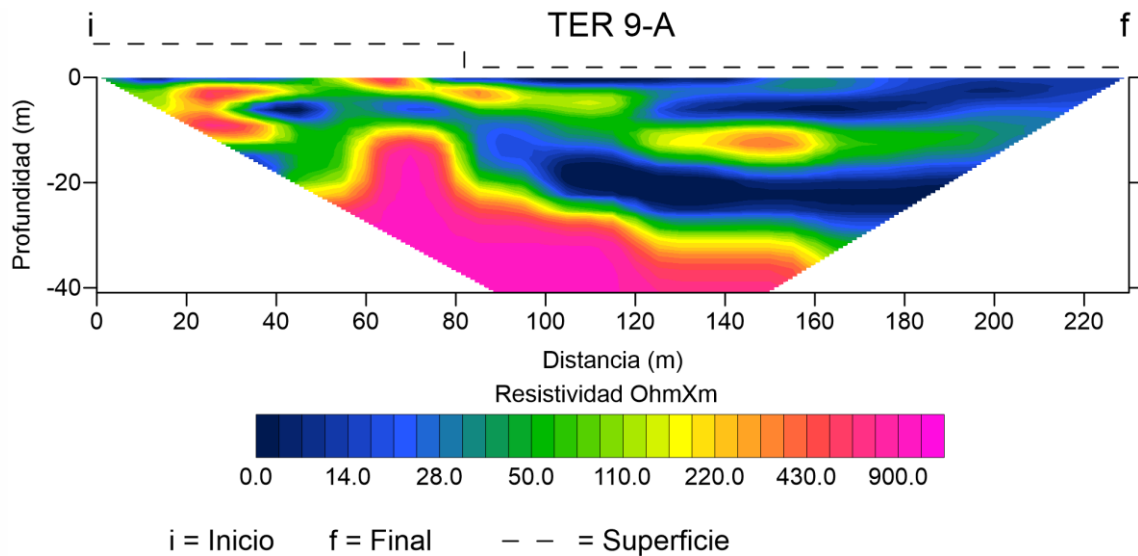


Figura 5.43 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 9 - A. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.42, La línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

La Figura 5.44 y Figura 5.45, muestran resistividades similares correspondientes a materiales finos o sueltos, con resistividad menores a 30 ohm x metro. En ambos lugares no fue visible una discontinuidad superficial. Siguiendo con la dirección de la discontinuidad mostrada en la Figura 5.43, se esperaba encontrar una discontinuidad a 150 metros y 185 para el perfil B y C, respectivamente.



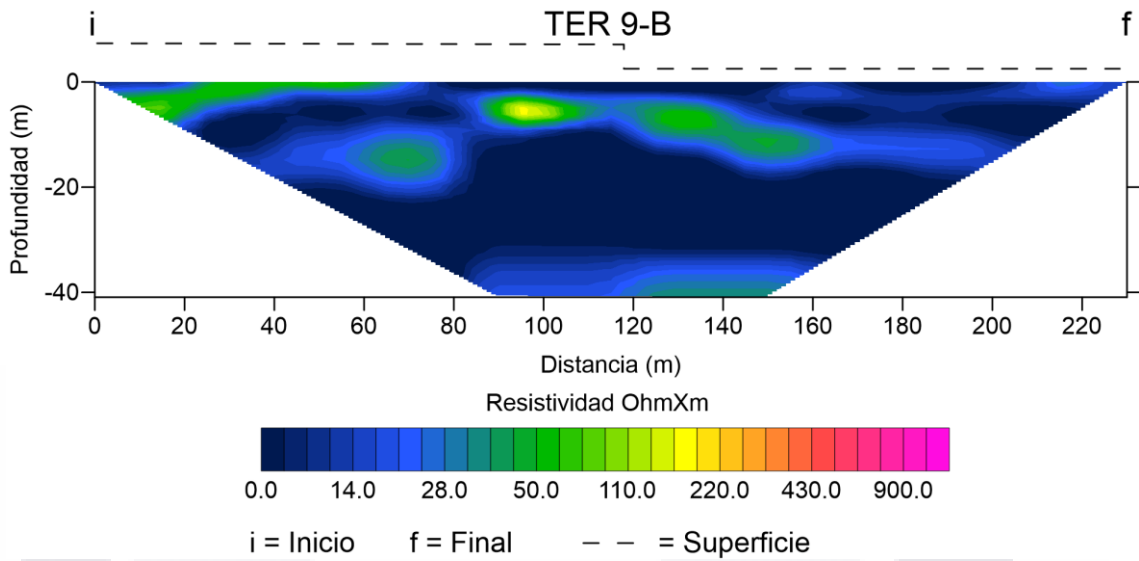


Figura 5.44 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 9 – B. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.42, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

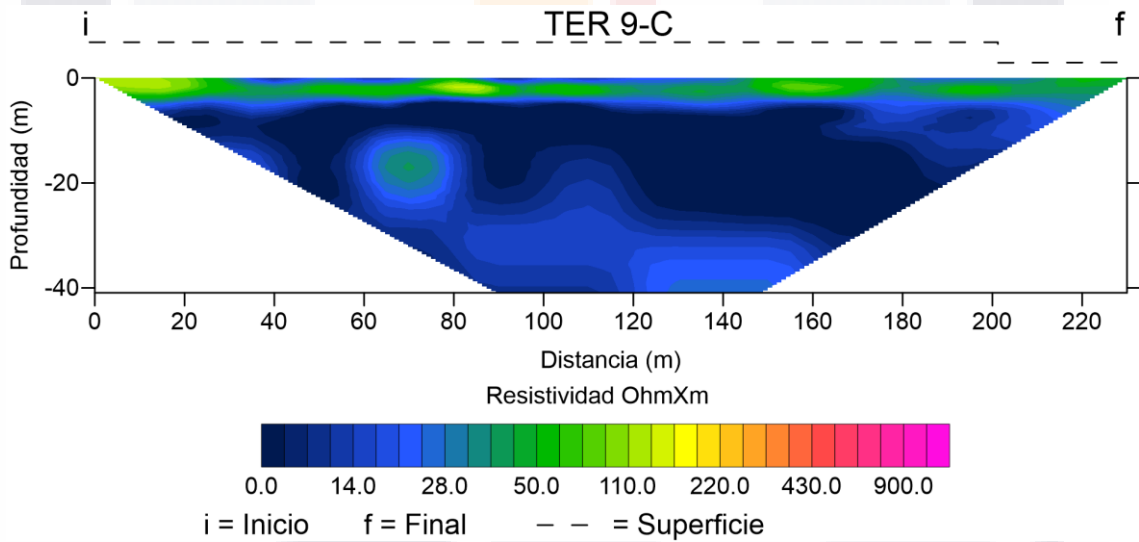


Figura 5.45 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, lugar 9 – C. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.42, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

## 5.4 Región cuatro

### 5.4.1 Lugar de medición número 10. Pensión de Jesús María

Este sitio se localiza sobre las fallas el Aurero 1 y 2, en el municipio de Jesús Marías sobre la carretera número 18, las coordenadas del lugar de medición son (775875 E, 2436062 N) (Figura 5.46). Estos levantamientos fueron realizados frente a una discontinuidad creada por la reactivación de paleocauces (Figura 5.47). Los modelo resultante de los levantamiento se presenta en la Figura 5.48 tomografía eléctrica A y Figura 5.49 tomografía eléctrica B.

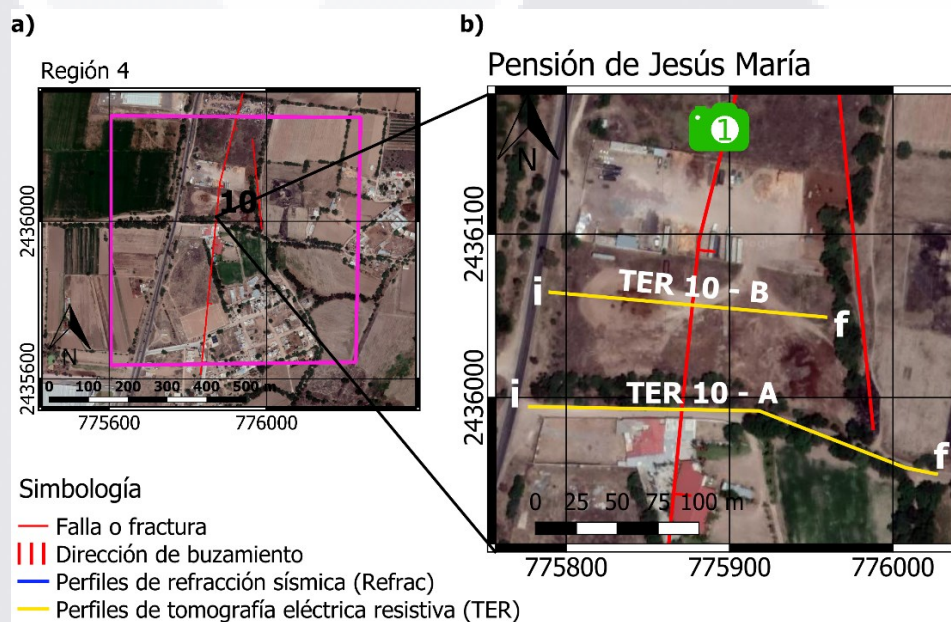


Figura 5.46 Sitio de estudio 10. a) Macrolocalización. Se muestran la región cuatro b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.47.



Figura 5.47 Imagen del sitio 10, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.46 1) Muestra la falla. La Figura 5.48 muestra el perfil de tomografía eléctrica levantado aproximadamente a 70 metros del final de la fractura. En él, se observan discontinuidades en un estrato de color azul entre los 90 y los 150 metros a una profundidad de 20 metros; también, se observa una capa resistiva superficial con valores de resistividad mayores 100 ohm-metro. La cual muestra una discontinuidad aproximadamente a 80 metros de distancia desde el origen.

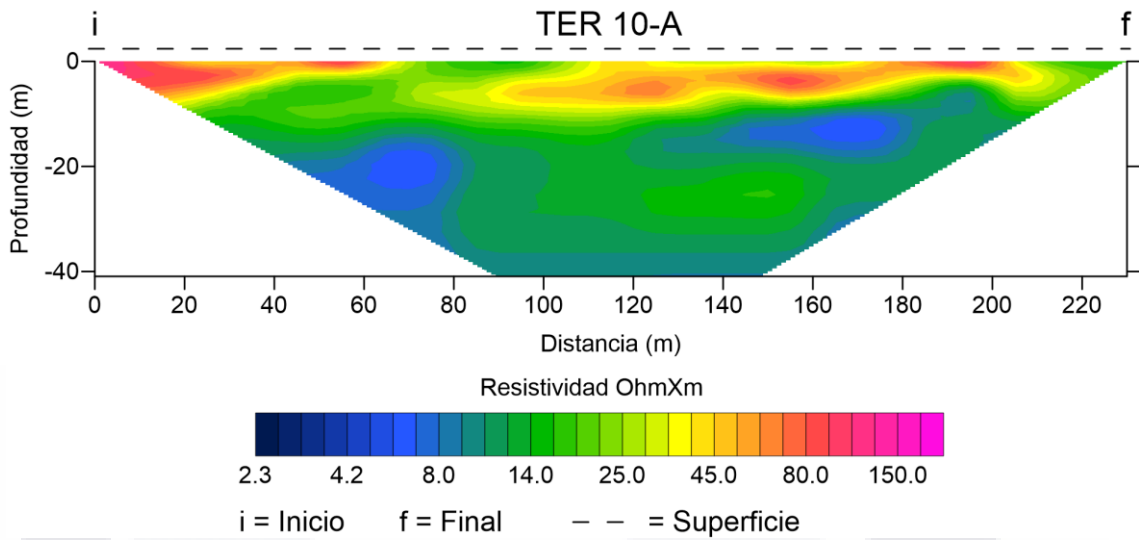


Figura 5.48 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, sitio 10-A. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.46, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

La Figura 5.49 fue levanta aproximadamente a 4 metros del final de la fractura. En ella se observa a partir de 60 metros desde el origen y una profundidad de 10 metros una anomalía en tono azul, en la misma dirección del final del paleocauce. También se observan tonos amarillo y rosas en la parte superficial, mismos que son obstruidos en la misma zona anterior, a partir de 60 metros de distancia desde el origen. Estos tonos azules probablemente son ocasionados por el agua que se acumula en esa zona.

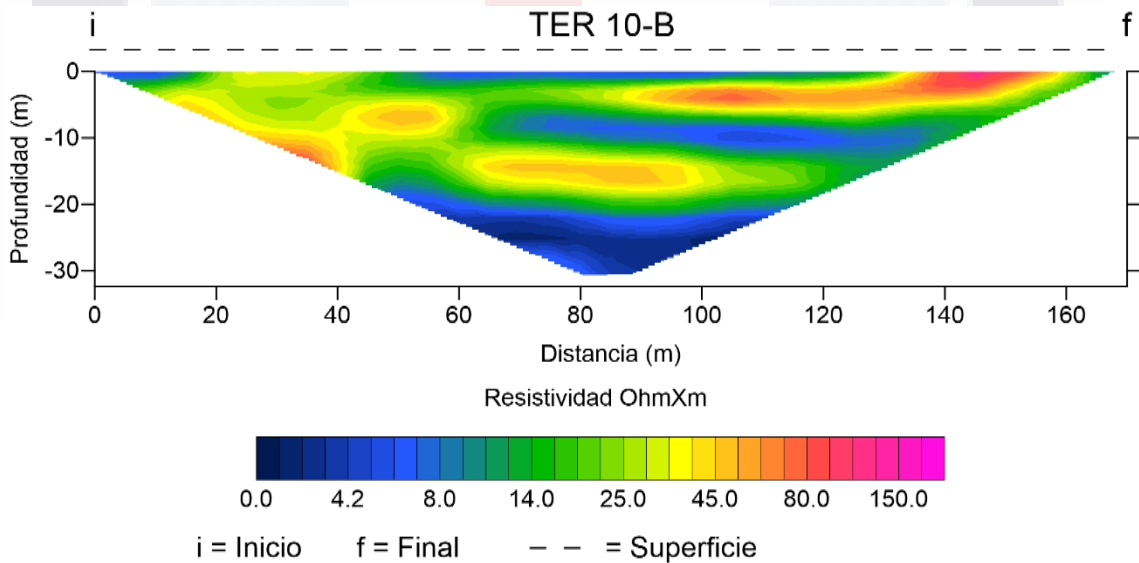


Figura 5.49 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, sitio 10-B. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.46, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

## 5.5 Región cinco

### 5.5.1 Lugar de medición número 11. 3er anillo y avenida constitución

Este sitio se localiza sobre la Falla Oriente Aguascalientes, entre la avenida tercer anillo y avenida constitución las coordenadas del sitio de estudio es (13 781445 E, 2428448 N) (Figura 5.50) en esta zona se presentan daños sobre la avenida tercer anillo y se muestra un escarpe definido por la topografía de aproximadamente 1.5 metros (Figura 5.51). La Figura 5.51 muestra el perfil de tomografía eléctrica.

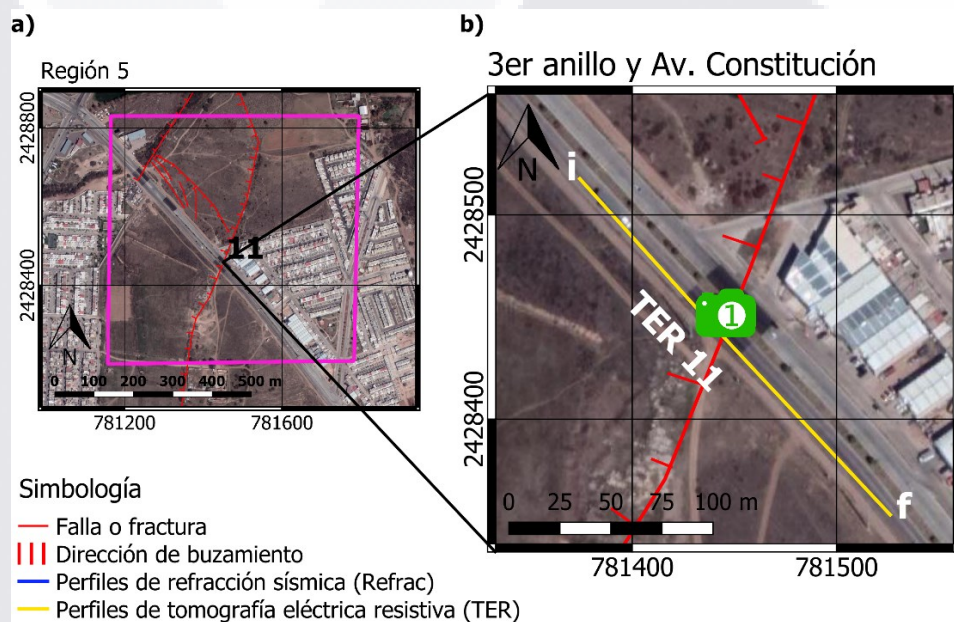


Figura 5.50 Lugar de estudios 11. a) Macrolocalización. Se muestran la región cinco b) Microlocalización. Se muestra el inicio y final de los perfiles de tomografía eléctrica y refracción sísmica, además de la ubicación de las imágenes mostradas en la Figura 5.51.



Figura 5.51 Imagen del sitio 11, la ubicación de las imágenes se muestra en la Figura 5.46 1) Muestra la falla, superior vista hacia el poniente e inferior vista al oriente.

La Figura 5.52 muestre un perfil con una variación vertical muy clara. Dicho cambio de material se ubica en la zona de la falla, aproximadamente a 120 metros de distancia desde el origen. En el lado poniente se observa material de menor resistividad en su mayoría menor a 40 ohm x metro, mientras que en el lado oriente las resistividades son mayores, alcanzando valores de hasta 150 ohm-metro.

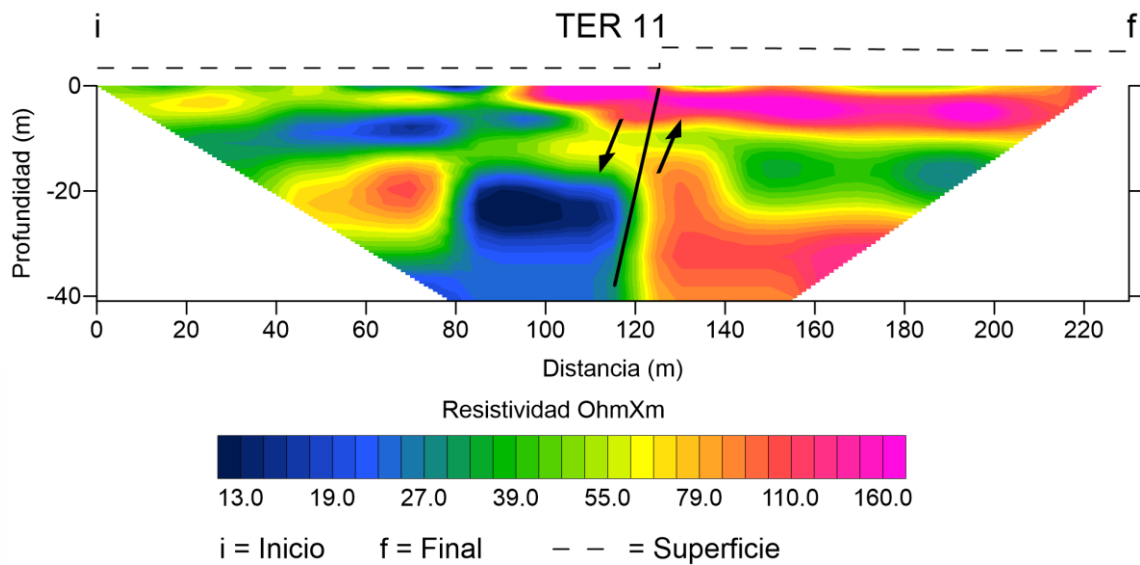


Figura 5.52 Perfil de tomografía eléctrica resistiva, sitio 11. La ubicación de este perfil se muestra en la Figura 5.50, la línea punteada superior representa la orientación del escarpe.

## 5.6 Caracterización de materiales

Para realizar una interpretación de los perfiles obtenidos en la investigación fue necesario realizar una caracterización de los materiales en el municipio de Jesús María en la Avenida de la Cruz, las coordenadas del sitio son (13 774633E, 2429970 N). Se obtuvieron materiales de una trinchera, la cual presentaba una estructura estratigráfica con diferentes materiales, además de la presencia de una falla. La prueba realizada fue *Soil-Box*, la cual consistió en realizar pruebas de resistividad en laboratorio con diferentes grados de humedad, para poder determinar una relación entre la humedad y la resistividad. Adicionalmente se realizó un perfil de resistividad eléctrica para conocer las variaciones de la resistividad directamente en el sitio de los trabajos.

Columna A. Se extrajeron dos tipos de materiales, el primero de 0 a 1 metro de profundidad, el segundo de 1 a 3 metros de profundidad. El primero corresponde a un estrato parcialmente consolidado de color rojizo, sub redondeado con clastos sub redondeados y sub angulosos de 12 mm a 2.0 cm de diámetro y con una matriz limo arcillosa en proporción líticos 30 % y 70 %, respectivamente (Mat 1). El segundo material extraído corresponde a un estrato parcialmente consolidado de color pardo con clastos sub anguloso de 4 mm a 3.0 de rocas sedimentarias no identificadas. La matriz es limo arcillosa con proporción 30 % – 70 % respecto a sus líticos (Mat 2) (Figura 5.53-a).

Columna B. Se extrajeron dos tipos de materiales, el primero de 0 a 1 metro de profundidad, el segundo de 1 a 3 metros de profundidad. El primero corresponde a un depósito de arena no litificada, con tamaños de fina a media, cristales de cuarzo y cristales blancos alargados no identificados, bien graduada, se observa estratificación cruzada (Mat 3). El segundo material corresponde a un depósito débilmente litificado con cristales de cuarzo color pardo claro y una matriz con pómez y pequeñas cantidades de material orgánico (Mat 4) (Figura 5.53-c):

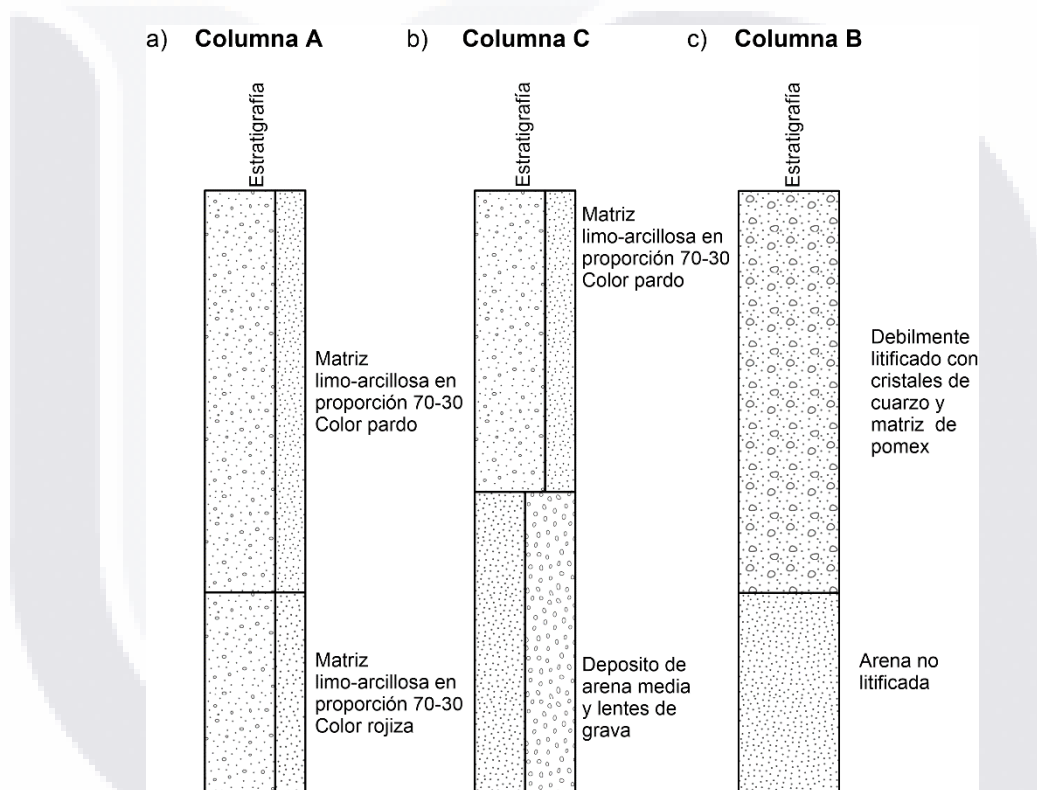


Figura 5.53 Columnas estratigráficas obtenidas en la trinchera. El lugar de muestro se muestra a) Columna A b) Columna C, c) Columna B.

Columna C. Se extrajeron dos tipos de materiales el primero de 0 a 1.5 metros de profundidad, el segundo de 1.5 a 3 metros de profundidad. El primero es un material de color rojizo-amarillo de arena media con lentes de gravas (Mat 5). Se le observó estratigrafía cruzada y bloques embebidos en el depósito fluvial, el cual se observó desplazado por una falla de 45 grados hacia el oeste. El segundo material extraído es similar al segundo material de la columna B (Mat 4) (Figura 5.53-b). Además de estos materiales, se encontró un estrato



de muy poco espesor acomodado de manera aleatoria, de ceniza volcánica, la cual también fue caracterizada (Mat 6).

Los valores de resistividad y humedad se muestran en la Figura 5.54, en la cual se observa que los materiales muestreados tienen un comportamiento similar; se comportan de manera exponencial antes del 0.20 de humedad, mientras que después del 0.20 de humedad tienen a tener un comportamiento lineal. A pesar de los comportamientos diferentes son muy pequeñas las diferencias entre ellos, lo que hace muy complicada la tarea de clasificar de acuerdo a su resistividad con materiales heterogéneos.

La Figura 5.55 muestra el perfil de resistividad eléctrica medido sobre la trinchera, se observan valores desde 2 hasta 140 ohm-metro en estado natural. La discontinuidad se muestra entre los 10 y 11 metros; otra discontinuidad se presenta casi a 45 grafos desde los 14 a los 15 metros.

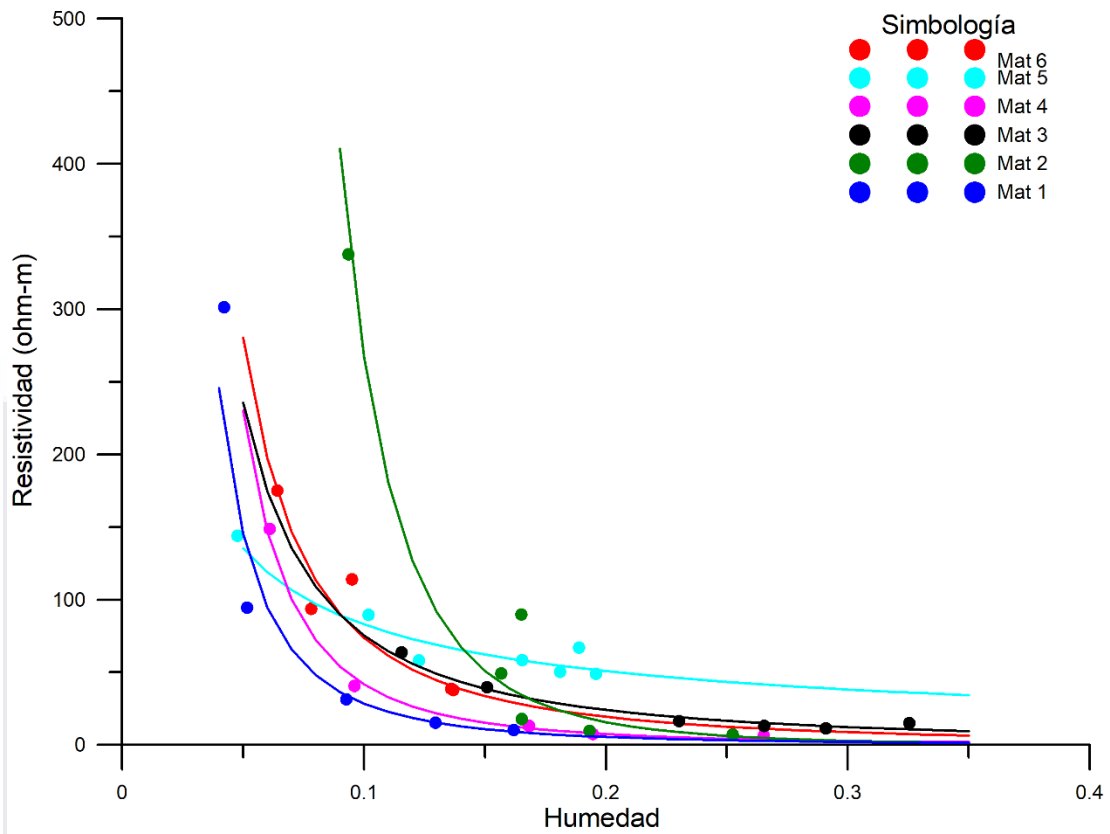


Figura 5.54 Gráfica de resistividad - Humedad para diferentes materiales en el valle de Aguascalientes. Mat en color azul, Mat 2 en color verde, Mat 3 en color negro, Mat 4 en color magenta, Mat 5 en color cian y Mat 6 en color rojo.

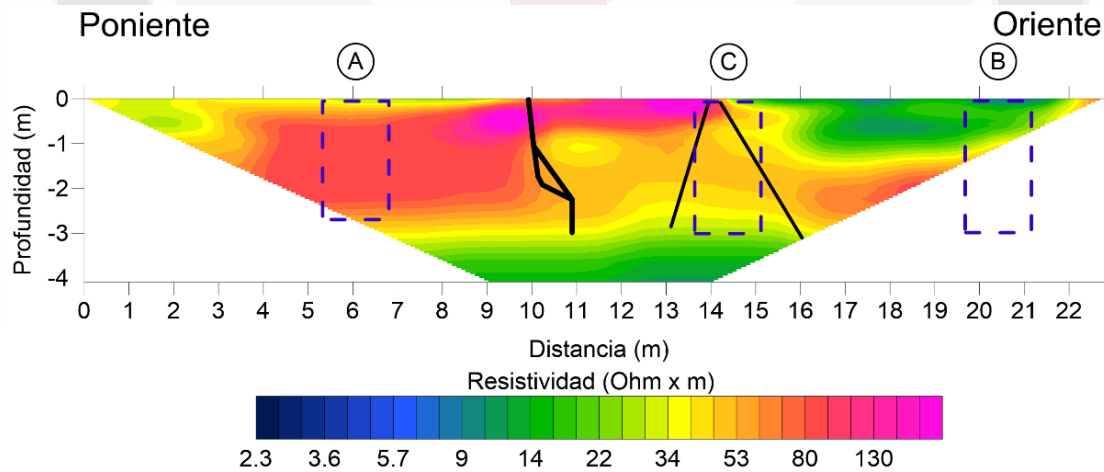


Figura 5.55 Perfil de tomografía eléctrica, en el sitio de la caracterización, la ubicación se muestra en la Figura 4.1. La línea negra representan las fracturas encontradas en la trinchera, los rectángulos azules indican la ubicación de los perfiles mostrados en la Figura 5.53.

## 6 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

---

### 6.1 Perfiles de tomografía eléctrica

Los perfiles de tomografía eléctrica en la región uno (Figura 5.3, Figura 5.9, y Figura 5.15) muestran principalmente dos tipos de materiales, así como resistividades bajas y altas. En el sitio uno de esta región, el estrato con resistividad alta presenta un desfase vertical entre los estratos aproximadamente a 80 metros desde el origen, esta diferencia de estratos genera que el estrato superior posea espesores diferentes en ambos lados de la falla. Este mecanismo de discontinuidad ha sido descrito en la Figura 3.3 (Larson, 1987), este mecanismo está asociado a los diferentes espesores de los estratos blandos con que se formó el valle (Figura 6.1-a). En el sitio dos, el escarpe es de 0.90 metros, mientras que los daños en la infraestructura únicamente presentan grietas en los muros de no más de 5 cm. Considerando la topografía del lugar, se podría asumir que esta falla existía antes que las construcciones cercanas, lo que sugiere que es una falla de mayor antigüedad al efecto regional de subsidencia (Figura 6.1-b). El lugar tres, la topografía del lugar no muestra claramente una falla; sin embargo, si se observa una pendiente hacia el centro del valle; además, se observan grietas que fueron rellenas (Figura 6.1-c). Dado que el relleno pudo tomar un tiempo considerable (Pacheco-Martínez et al. 2013) esto revela que la falla existía antes del efecto de subsidencia.

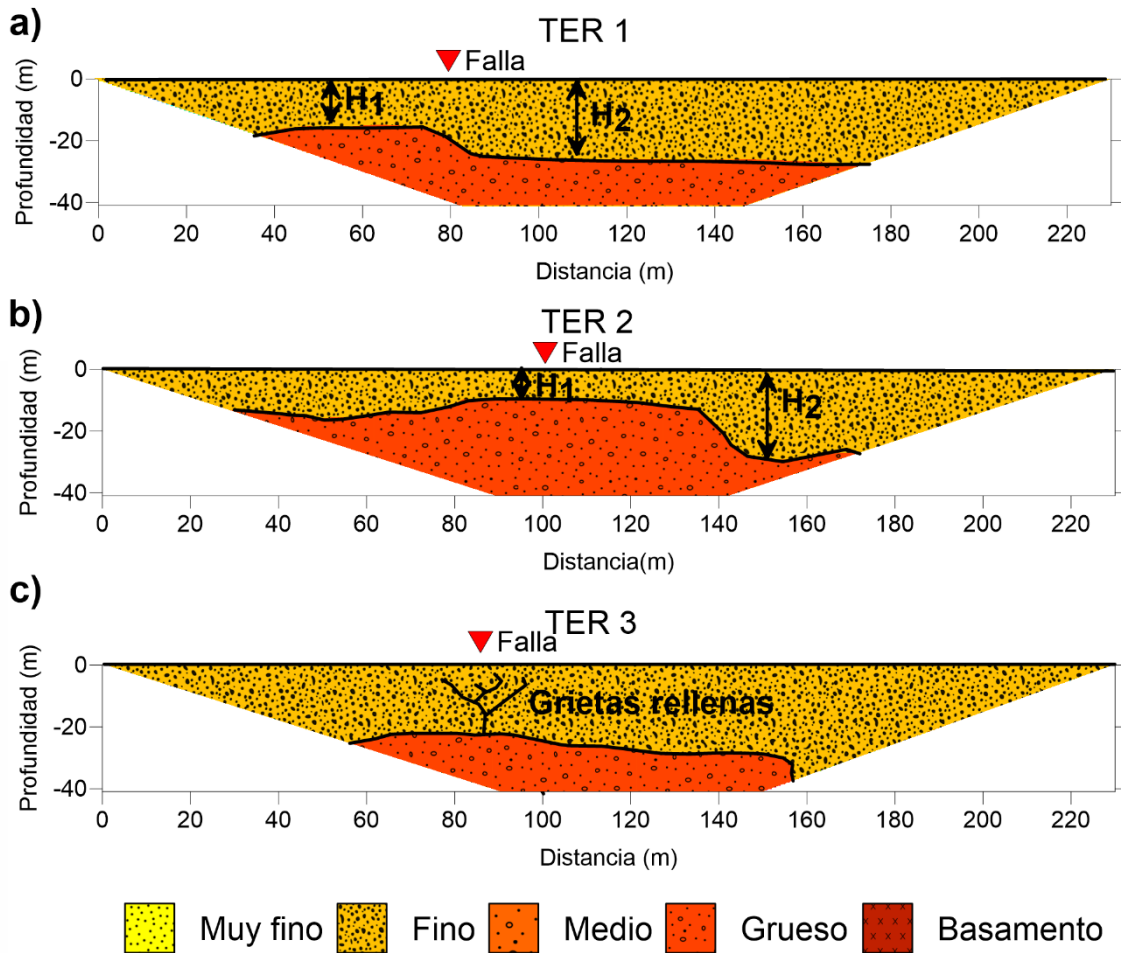


Figura 6.1 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 1, Las H's representan el espesor del estrato. a) Interpretación del TER 1, b) Interpretación del TER 2 c) Interpretación del TER 3.

En la región dos, las resistividades bajas indican que se trata de materiales finos o poco consolidados (Figura 5.21, Figura 5.27, Figura 5.33, Figura 5.38 y Figura 5.40). El sitio 4 mostró un acomodo horizontal en la estratigrafía, mientras que las estructuras estratigráficas encontradas no sugieren que exista una susceptibilidad al fracturamiento (Figura 6.2-a). Las diferentes resistividades horizontales podrían ser producto de la humedad generada por el arroyo cercano, esta humedad pudo ser acumulada en ese estrato y presentar resistividad menor. El sitio cinco, la falla muestra un ligero escarpe junto a una zona no bien definida de daños en el asfalto. El perfil de resistividad muestra dos anomalías al centro, una con resistividad baja y la otra alta, las cuales, podrían estar directamente asociadas a un paleocauce adyacente (Figura 6.2-b). Las resistividades bajas se podrían deber a la acumulación de agua y las resistividades altas a la presencia de oquedades en el paleocauce

producto del flujo de agua. El sitio seis, muestra un escarpe en la superficie de aproximadamente 15 cm, mientras que en el perfil de tomografía se observa un estrato de mayor resistividad, el cual presenta un desfase de aproximadamente 5 metros a partir de 80 metros desde el origen (Figura 6.2-c). Este tipo de estratigrafía se asocia a estratos con diferentes espesores (Figura 3.3) El sitio siete, muestra un arreglo horizontal de estratos, en el cual antes de 80 metros desde el origen se observa una discontinuidad en la estratigrafía (Figura 6.2-d), dicha discontinuidad no se manifiesta en la superficie. Este perfil se realizó siguiendo la traza hacia el norte de la falla estudiada en el sitio uno, y muestra materiales con resistividades diferentes, en el cual no es posible encontrar resistividades altas presentes en el sitio uno. En el sitio uno la discontinuidad se observa en la superficie y se muestra un claro cambio vertical en la estratigrafía, que sugiere sea el motivo del desarrollo de la falla, en el sitio siete no es posible ver ese cambio; sin embargo, las resistividades de los rellenos son similares, lo que sugiere que el estrato de resistividad mayor a 100 ohm-m se encuentra a una profundidad mayor de 40 metros, la cual no fue posible encontrar con esta metodología y está ligado con la generación de la falla superficial en el sitio uno. Por lo cual para esa zona se sugiere realizar una nueva prueba con una resolución mayor o realizar exploración física a partir de una trinchera para identificar si la discontinuidad está en edad temprana de formación o es un lugar susceptible al desarrollo de fracturas. El sitio ocho, ubicado siguiendo la traza hacia el norte de la falla estudiada en el sitio seis. No presenta una discontinuidad superficial, pero el perfil de resistividad muestra una discontinuidad en el estrato sepultado a una profundidad de 25 metros entre los 120 y 160 metros desde el origen (Figura 6.2-e). Los valores de resistividad entre el sitio seis y ocho refieren a que los materiales son similares en ambos sitios. Sin embargo, en el sitio seis si existe una falla superficial y en el sitio ocho no. Es importante mencionar que la presencia de desafeases verticales en los estratos profundos hace que los rellenos superiores tengan espesores variables y esto facilita la presencia de discontinuidades (Larson, 1987). Esto podría explicar la razón de porque en el sitio seis si es posible observar una discontinuidad y en el sitio ocho no. Se sugiere realizar otra medición con mayor resolución en el sitio ocho para determinar si existe una fractura incipiente en la zona y si es necesario realizar una excavación y realizar una exploración física.

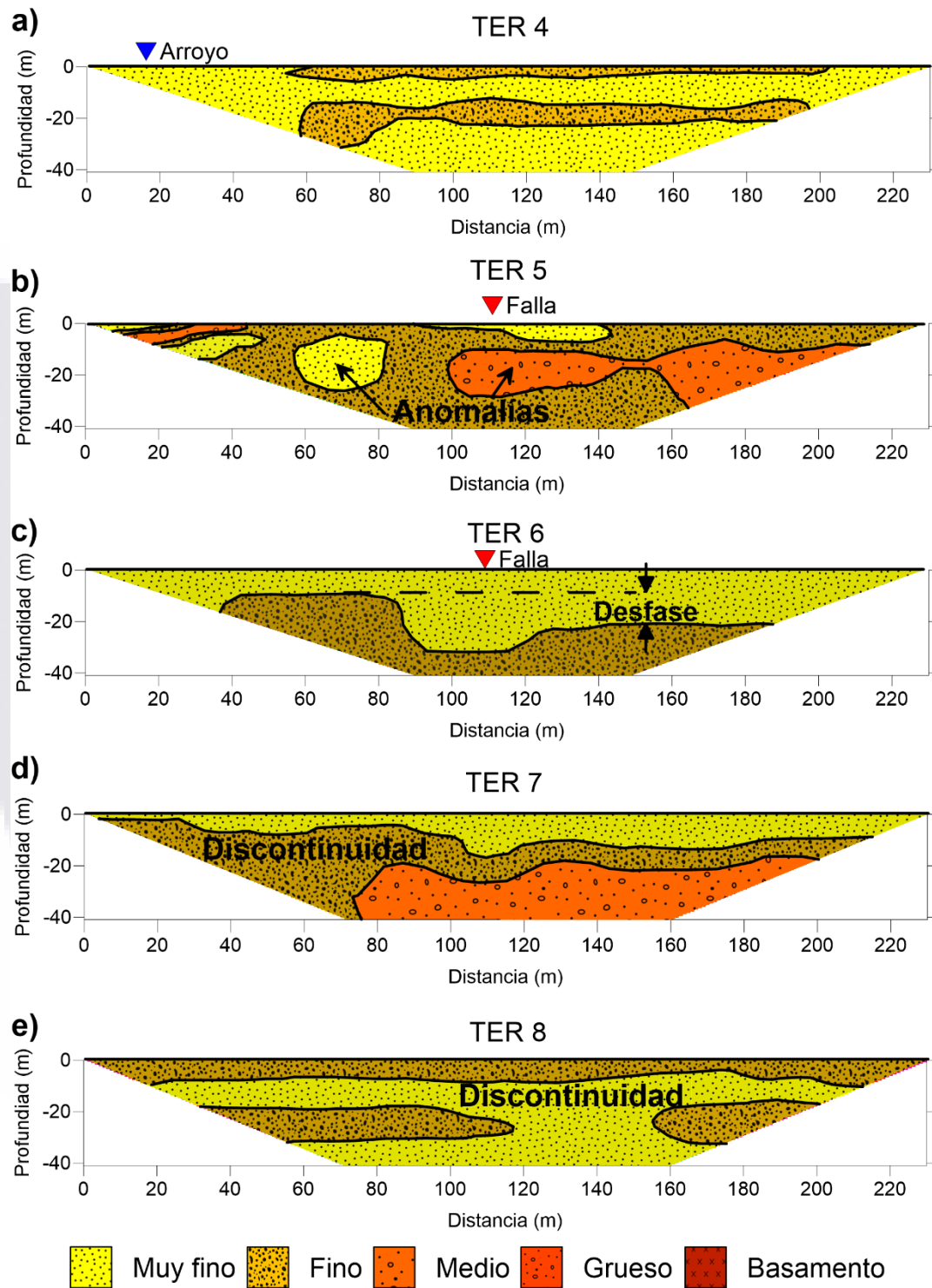


Figura 6.2 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 2. a) Interpretación del TER 4 b) Interpretación del TER 5 c) Interpretación del TER 6 d) Interpretación del TER 7 e) Interpretación del TER 8.

En la región tres, sobre la falla poniente la cual tiene un origen geológico con el cual se formó el valle de Aguascalientes (Hernández-Marín et al. 2015); se pueden encontrar dos tipos de materiales principalmente: el lecho rocoso y material de relleno que conforman el valle. En la medición de la línea A, se observó una discontinuidad superficial aproximadamente a 80 metros desde el origen, en el perfil se puede distinguir el basamento (Figura 6.3-a), ya que el primer electrodo fue hincado sobre el lecho rocoso que aflora en la superficie. Según lo mostrado en este perfil, el menor espesor de materiales de relleno se localiza justo abajo de la falla. En las líneas B y C, no fue posible encontrar una discontinuidad superficial como en la línea A, únicamente se pueden observar materiales de baja resistividad asociados a rellenos que forman el valle (Figura 6.3-b y Figura 6.3-c); por lo tanto, en esta zona la profundidad del lecho rocoso tiene un papel muy importante para la generación de fallas y fracturas; tal como lo dice Larson y Pewe (1986) y Larson (1987), la profundidad del lecho rocoso determina la generación de discontinuidades superficiales. Diferentes mecanismos de fracturamiento podría ser asociado a esta región, principalmente para estar en la extremo del valle, de se pueden encontrar pendientes fuertes en el basamento (Figura 3.2), diferentes espesores de los materiales compresibles con que es formado el valle de Aguascalientes (Figura 3.3) y generación de nuevas fracturas conforme la zona de hundimientos crece en el valle (Figura 3.4). En las líneas B y C, el basamento se encuentra a una profundidad mayor de 40 metros, ya que no se observa en los perfiles, por lo que es menor la susceptibilidad a formación de discontinuidades. En esta región se podrían generar sistemas de fallas paralelas, por lo tanto, también se sugiere levantar más perfiles entre las línea A y B para determinar la profundidad del lecho rocoso y localizar una posible falla superficial.

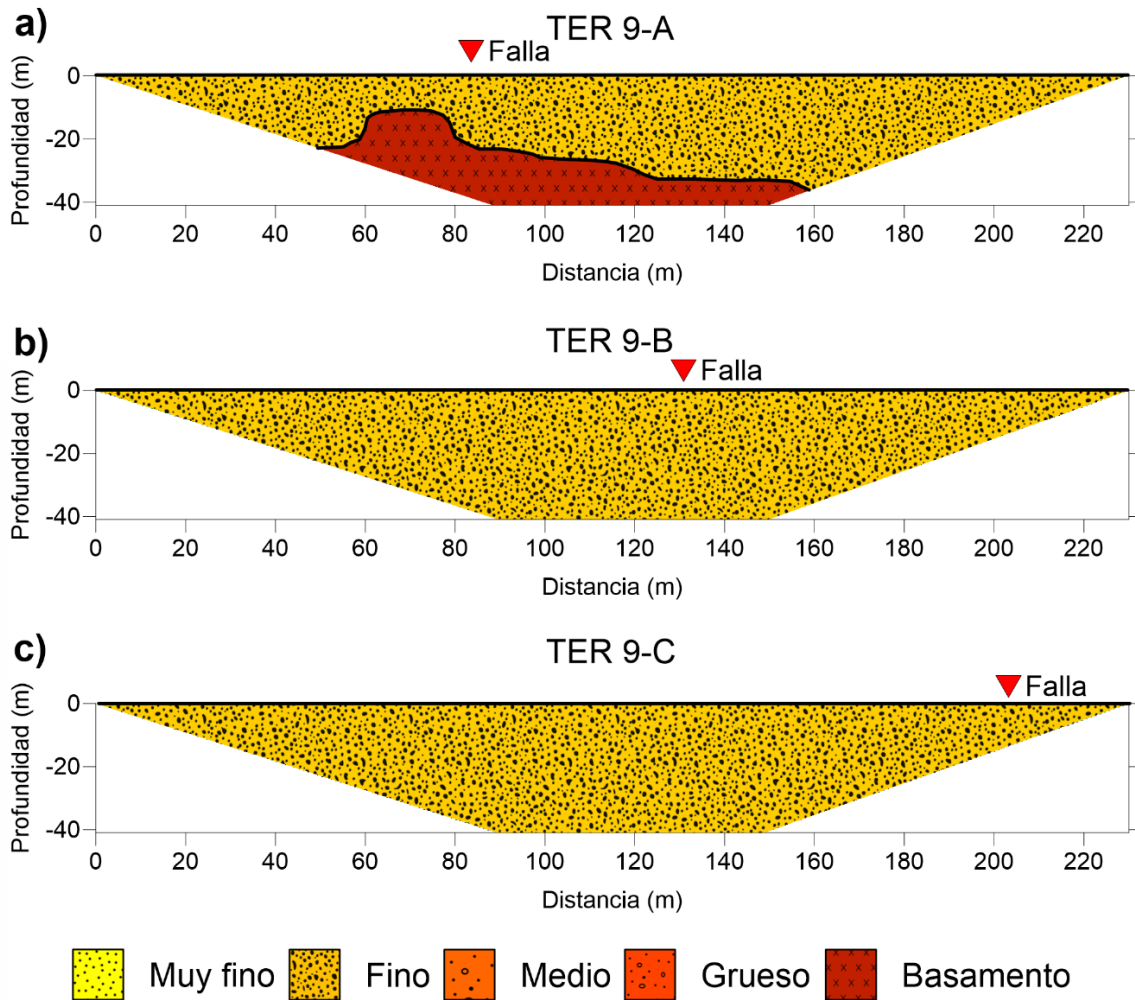


Figura 6.3 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 3 a) Interpretación del TER 9-A b) Interpretación del TER 9-B c) Interpretación del TER 9-C.

La región 4 se ubica siguiendo la traza de una fractura creada por la reactivación de un paleocauce. En la línea B, el perfil muestra zonas de baja resistividad creadas posiblemente por la presencia de humedad. A pesar de que en esta zona no se observa la fractura, posiblemente a que el espesor de materiales de relleno sobre el paleocauce es mayor que el espesor donde ya se ha fracturado. Según el perfil en este sitio (Figura 6.4-b) el espesor sobre el paleocauce es de aproximadamente 6 metros, mientras el espesor donde se fracturó era de 3 metros aproximadamente (Figura 5.42). En la línea A (Figura 6.4-a), el cual fue tomado siguiendo la traza de la falla igual que el A pero a una mayor distancia de separación, en él tampoco se presentan fracturas. En este perfil se muestran zonas con los mismos valores de



resistividad que en el perfil B. Estas zonas están asociadas a la presencia de paleocauces y por los mismos motivos que en el la línea B aún no se ha presentado una fractura.

La forma en que se presentan los paleocauces es de forma súbita en la superficie, aunque no quiere decir que las oquedades entre los materiales es necesariamente de forma rápida, podría tomar años el arrastre de partículas finas o tomar horas, todo en función de la energía con la que ocurra el flujo de agua; por lo cual, es necesario poner atención en este tipo de anomalías que se encurtan siguiendo la traza de una discontinuada ya existente. Primero, realizar más levantamientos en las zonas con anomalías para delimitar las dimensiones con mayor resolución; después, realizar una exploración con una trinchera en zonas específicas y realizar la delimitación exacta para poder mapearla, de esta manera se podrá conocer la zona susceptible al fracturamiento.

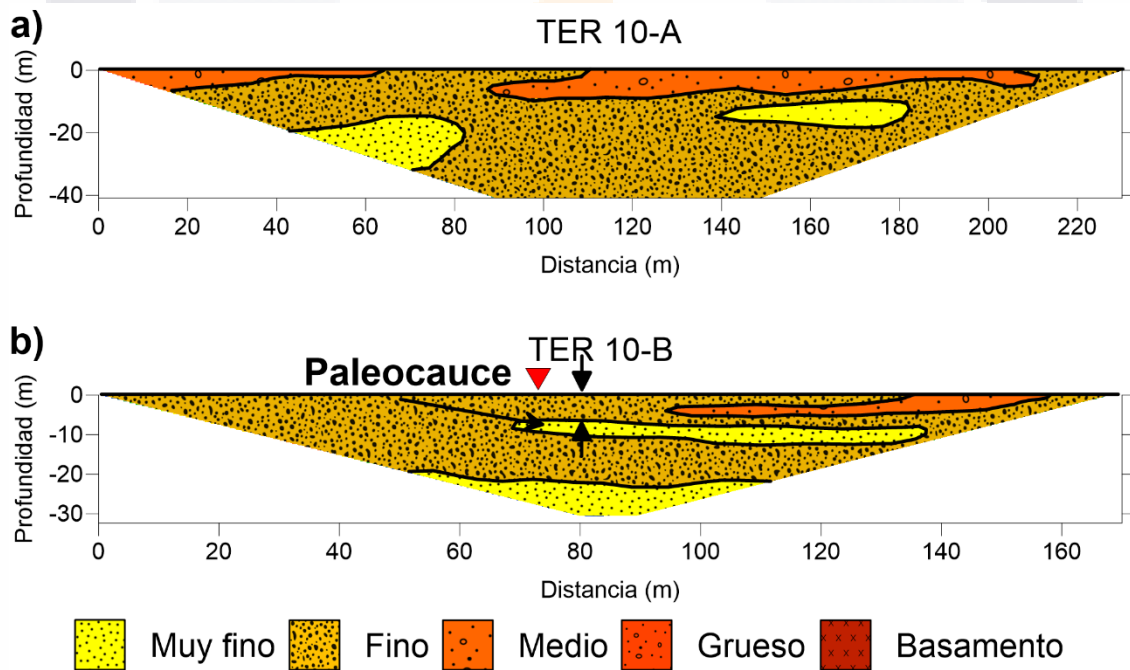


Figura 6.4 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 3. a) Interpretación del TER 10-A b) Interpretación del TER 10-B.

La región 5, sobre una falla sepultada y reactivada por el efecto de la subsidencia (Hernández-Marín et al. 2015). El perfil levantado muestra dos diferentes tipos de materiales separadas en la zona donde se encuentra la falla. En esta región se puede asociar el mecanismo de fallamiento por diferentes materiales de forma vertical (Larson, 1987) (Figura 3.5); sin

embargo, se sabe que la falla es antigua, por lo que el mecanismo que mejor describe el fallamiento es de una falla sepultada, que fue rellena por materiales durante la formación del valle (Slaff, 1993) (Figura 3.6). Con el efecto local de subsidencia los materiales se han consolidado de manera diferencial, lo que se representa en la superficie como una falla en el mismo sentido que la falla sepultada por el material de relleno.

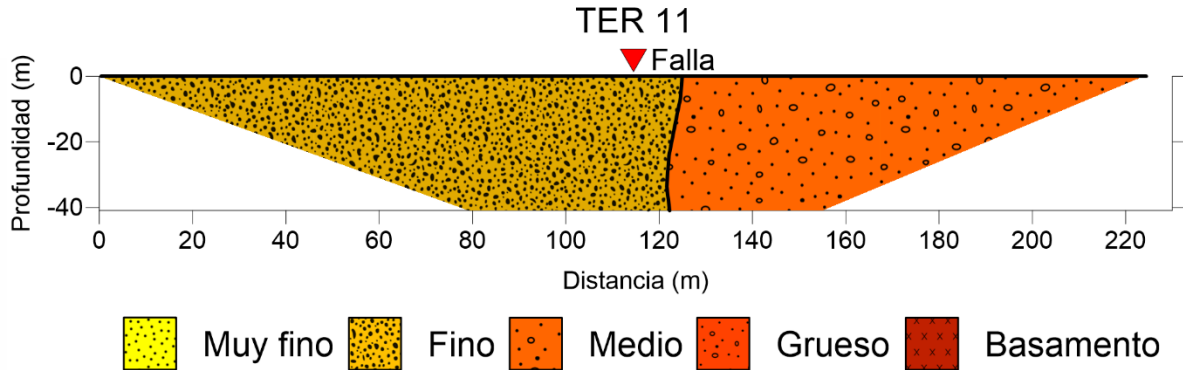


Figura 6.5 Interpretación de perfiles de tomografía eléctrica en la región 2, TER 11.

## 6.2 Perfiles de refracción sísmica

Los perfiles de refracción sísmica en la región uno (Figura 5.4, Figura 5.10 y Figura 5.16) muestran un rango de velocidades desde 0.35 a 1.45 km/s. Estos perfiles muestran un arreglo horizontal en los estratos, donde las velocidades se incrementan en función de la profundidad. En la región dos (Figura 5.22, Figura 5.28 y Figura 5.34) se observa el mismo arreglo, pero a diferencia de la región uno, en esta región las velocidades son menores, desde 0.35 a 1 km/s. Esta variación en las velocidades nos indica que los materiales en la región 1 tienen una mayor densidad o dureza que los materiales encontrados en la región dos. En ambas regiones es fácil notar una zona de baja velocidad, (colores azules), estas zonas coinciden con la zona donde se encuentra la falla.

La velocidad de las ondas P, está en función de la densidad y propiedades mecánicas como: módulo de *Young*, relación de *Poisson* y módulo de cortante. En las zonas de bajas velocidad el principal motivo de la disminución es el cambio en la densidad del suelo. La variación de la densidad es la responsable de la pérdida de velocidad. Las fracturas presentes en el suelo son las que modifican la estructura del suelo, principalmente la densidad. Esta nueva densidad afectada por las discontinuidades es llamada densidad secundaria.

En la Figura 6.6 se muestra como se distribuyen las ondas sísmicas a través de la zona activa de la falla y una zona sin presencia de falla. Para las zonas sin fallas la velocidad y la densidad son mayores que en la zona activa de la falla.

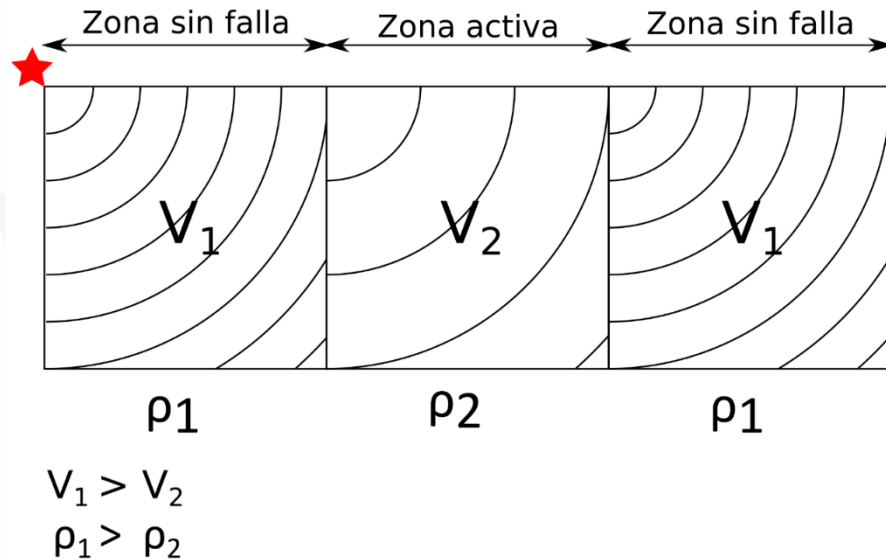


Figura 6.6 Viaje de ondas sísmicas a través de la zona activa de la falla y la zona sin falla, la estrella roja representa el origen de las ondas sísmicas. En ella se muestra dos zonas sin falla donde la velocidad ( $V_1$ ) es mayor a la velocidad en la zona activa  $V_2$ .

Con ayuda de las perfiles de refracción sísmica, se crearon figuras donde ilustran la zona activa de la falla, zona de transición y zona sin falla. La zona activa de la falla se refiere a la zona donde existen movimientos producto de la deformación del suelo y no se podría construir, a menos de tener una técnica para construir en zonas con asentamientos. La zona de transición aún son velocidades bajas, se maneja como una distancia de seguridad, donde no existe la falla pero aún podrían existir problemas en el suelo. La zona sin falla es la zona donde ya se puede realizar construcciones sobre ella, y no existen riesgo de presentar movimientos.

En la Figura 6.7 se muestran los tres perfiles de refracción sísmica correspondientes a la región 1. En el cual el sitio uno, se muestra una zona activa de la falla de aproximadamente 10 metros y una zona de transición de 40 metros, aunque esta zona de transición no es visible en el lugar, es importante tener un margen de seguridad (Figura 6.7-a). El sitio dos, se muestra una zona activa de aproximadamente 15 metros y zona de transición de 30 metros (Figura

6.7-b). El sitio tres, es el que mejor delimita las zonas, la zona activa de la falla tiene una longitud de aproximadamente 15 metros mientras que la zona de transición es de 30 metros (Figura 6.7-c).

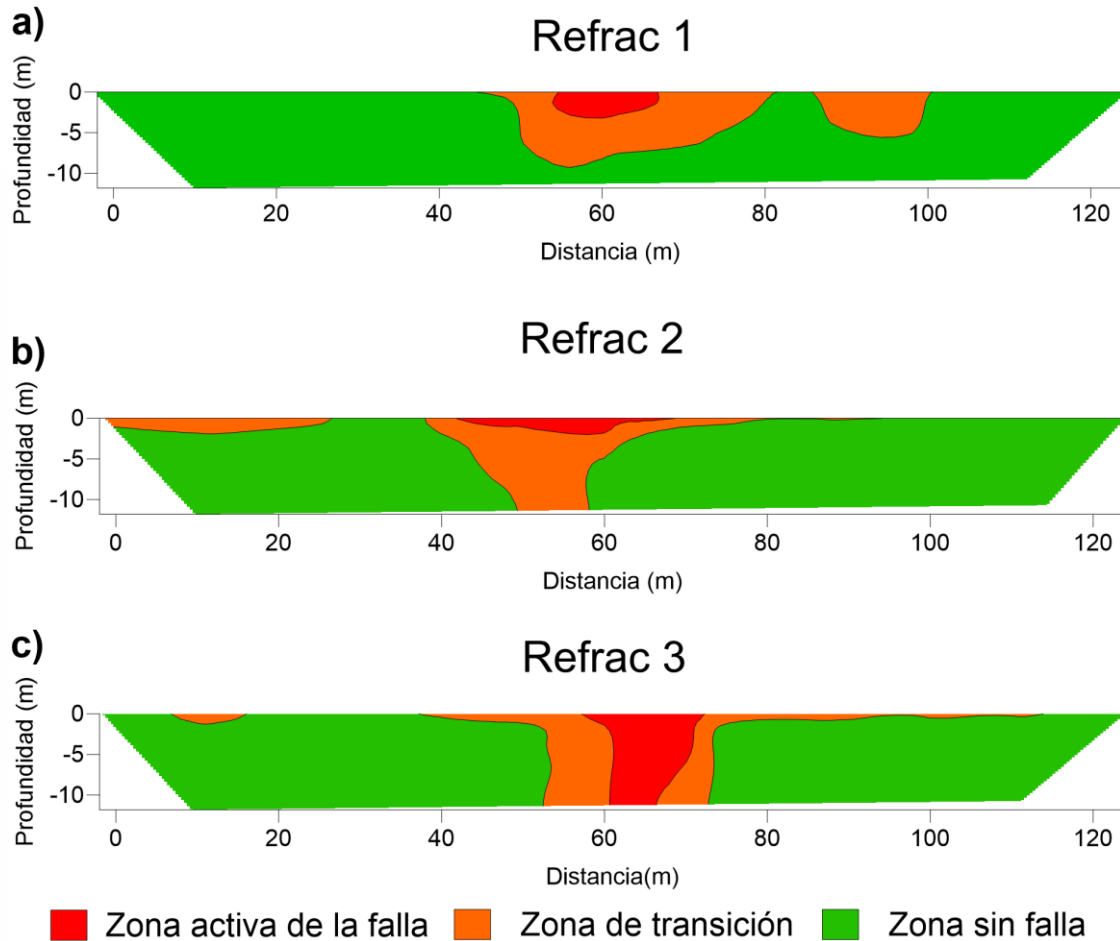


Figura 6.7 Interpretación de perfiles de refracción sísmica en la región uno; el color rojo representa la zona donde la falla está activa, el Color naranja representa la zona de transición y el color verde representa la zona sin falla. a) Interpretación de la Figura 5.4 b) Interpretación de la Figura 5.10 c) Interpretación de la Figura 5.16.

La Figura 6.8 muestra los perfiles de refracción sísmica en la región dos, al igual que en la región uno, se realizó una delimitación de los diferentes tipos de zonas de acuerdo a velocidad de propagación. El sitio cuatro, muestra una zona activa de aproximadamente 10 metros, y una zona de transición de 30 metros aproximadamente (Figura 6.8-a). El sitio cinco, muestra dos zonas activas, en la medición de refracción sísmica también fue posible ver anomalías en esta zona, se recomienda realizar una exploración con menor resolución para delimitar las

zonas y realizar una exploración física en una trinchera (Figura 6.8-b). Las zonas activas tienen una longitud de aproximadamente de 10 metros cada una y la zona de transición es de 60 metros aproximadamente. El sitio seis, muestra una zona activa de aproximadamente 10 metros, y una zona de transición de 20 metros (Figura 6.8-c).

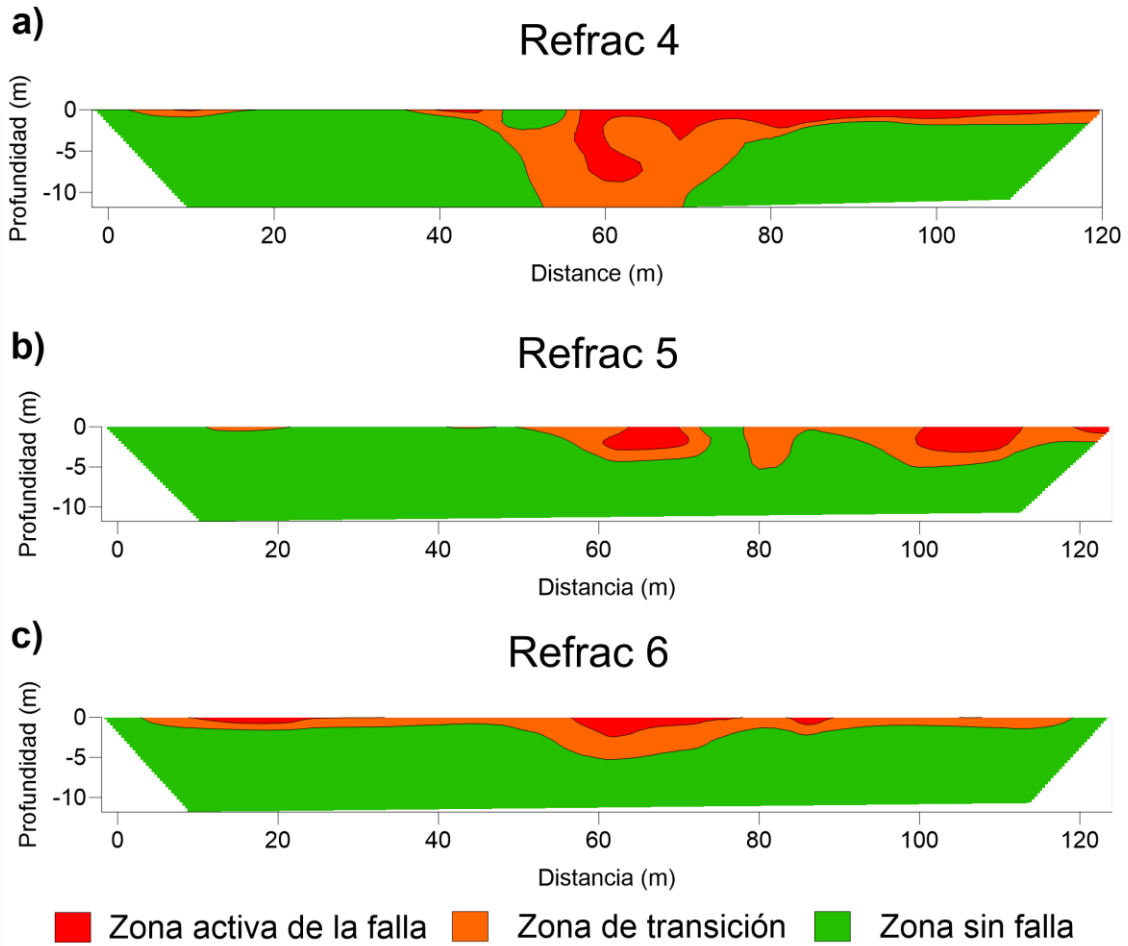


Figura 6.8 Interpretación de perfiles de refracción sísmica en la región dos; el color rojo representa la zona donde la falla está activa, el Color naranja representa la zona de transición y el color verde representa la zona sin falla. a) Interpretación de la Figura 5.22 b) Interpretación de la Figura 5.28 c) Interpretación de la Figura 5.34.

A pesar de que en la región 1 y 2 se realizaron la división por zonas, es necesario aclarar que no son las mismas velocidades las que delimitan a cada zona. En otras palabras, la zonificación de los perfiles se realizó para cada lugar de acuerdo con el perfil de refracción sísmica. A pesar de que en los perfiles de refracción sísmica las simbologías si son iguales

para la región 1 e iguales en la región 2, no se pudo zonificar de la misma forma, debido a que cada lugar tiene diferentes propiedades en el suelo como: configuración estratigráfica y características de heterogeneidad y anisotropía. Si se realizara de la misma forma el resultado fueran zonas poco probables o en su caso algunas desaparecerían.

Las domocronas y las gráficas de distancia contra velocidad, muestran de manera gráfica y numérica los cambios en las propiedades mecánicas y densidad del suelo, que origina como consecuencia ese cambio de pendiente en las domocronas y la disminución de la velocidad en los puntos graficados. Estos serán medidas alteras para la determinación de la zona activa de la falla.

Estos resultados coinciden con Imposa et al. (2015), donde determinó una zona de baja velocidad producto del cambio en las propiedades del suelo en la zona de la falla.

### **6.3 Perfiles de MASW 1D**

Los perfiles de *MASW 1D* que se realizaron en la región uno y dos, fueron utilizados para verificar que perfiles de refracción símica fueron realizados de manera correcta. En ambos métodos se mostró un aumento en la velocidad de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, onda P para el método de refracción y onda s para el método de *MASW 1D*. Sin embargo este método pudo ser más útil para encontrar diferencias en estratigrafía de manera vertical, debido a que las mediciones se realizaron al inicio y al final de cada arreglo de los geófonos sin importar la ubicación de la falla.

Si las mediciones fueran a una distancia conocida a partir de las fallas, se entraría bajas velocidades relacionadas con la zona activa de la falla, de esta forma se podría realizar una delimitación con mayor detalle de la zona activa de la falla.

### **6.4 Caracterización de materiales**

La caracterización de los materiales mostró que para diferentes materiales y humedades, existe un cambio en los valores de resistividad. Conforme aumenta la humead los valores de resistividad son más bajos, esta tendencia se registró en todos los materiales. En la Figura 5.54, se puede observar como en todos los materiales se continúa aumentando la humedad los valores de resistividad varían muy poco a partir de 0.20 de humedad. Los rangos de

resistividades encontrados en general fueron desde 5 ohm-metro hasta 300 ohm-metro. Estos valores de resistividad son muy similares a los encontrados en los 11 perfiles de tomografía eléctrica. Para poder visualizarlos mejor los rangos de resistividad en los materiales caracterizados, se creó la Figura 6.9 con los rangos de resistividad para cada material.

Según Lowrie, (2007) los rangos de resistividad mostrados en la Figura 2.2 en comparación con los rangos desarrollados en esta investigación (Figura 6.9) son rangos diferentes; pero los datos de la literatura se refieren a suelos puros, o sea en el valle de Aguascalientes encontramos suelos con arcillas y limos entre otras combinaciones, son materiales muy heterogéneos. En la literatura no existen combinaciones reportadas como en el valle de Aguascalientes, si consideramos los rangos calculados en esta investigación, ayudarían a inferir sobre los materiales encontrados y saber si se refiere a un suelo fino o grueso, en su mayoría son suelos finos.

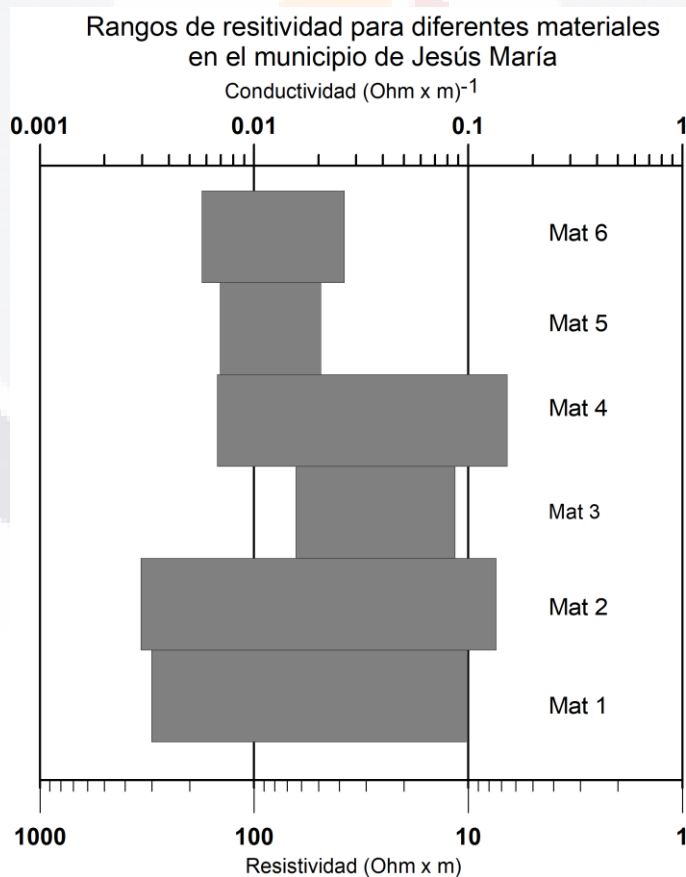


Figura 6.9 Rangos de resistividades para materiales en el municipio de Jesús María, Aguascalientes.

## 7 CONCLUSIONES

---

### 7.1 Conclusión general

La determinación de un terreno a la susceptibilidad y determinación de ancho activo de la falla, a partir de métodos geofísicos, consiste en:

1. Realizar una evolución física superficial del terreno, tratando de encontrar grietas u hoyos que indique la existencia de una falla en la zona. Si se encuentra una falla es necesario realizar pruebas de refracción sísmica y *MASW ID*, para determinar la zona activa.
2. Realizar pruebas de tomografía eléctrica resistiva sobre el terreno. Será necesario hacer la cantidad de mediciones requeridas para que la zona en su totalidad se encuentre explorada y poder realizar un buen dictamen.
3. Si en los perfiles de tomografía eléctrica se observan anomalías que sugieran la presencia de fallas. Se realizará otra medición con un arreglo de electrodos menor para encontrar una mejor resolución del perfil. Si continúa la presencia de la anomalía será necesario hacer una exploración física de manera puntual para la zona, hacer una excavación y buscar la discontinuidad. Si se encuentra la discontinuidad, es necesario delimitar el ancho activo de la falla con métodos sísmicos.
4. Hacer una revisión sobre los perfiles de tomografía eléctrica para encortar variables en la configuración estratigráfica. Las variables estratigráficas que pueden ayudar a la generación de fracturas son: Estratigrafía con protuberancias, Discontinuidades asociadas con el nivel freático, fuertes cambios de pendiente en el basamento, pendientes suaves a la orilla del valle, variaciones verticales en los estratos, reactivación de falla sepultada con rellenos durante la formación del valle y reactivación de paleocauces.
5. Si se encuentran condiciones que ayuden a formación de discontinuidades, es importante realizar pruebas de tomografía eléctrica con un arreglo de electrodos menor, para encontrar una mejor resolución y realizar las pruebas sísmicas para la determinación del ancho activo de la falla.



6. Finalmente, si no se encuentra falla y no existe una configuración que propicie la generación de fracturas, el terreno no es susceptible al fracturamiento y fallamiento. La metodología descrita se muestra en la siguiente figura, de manera sencilla y clara (Figura 7.1 ).

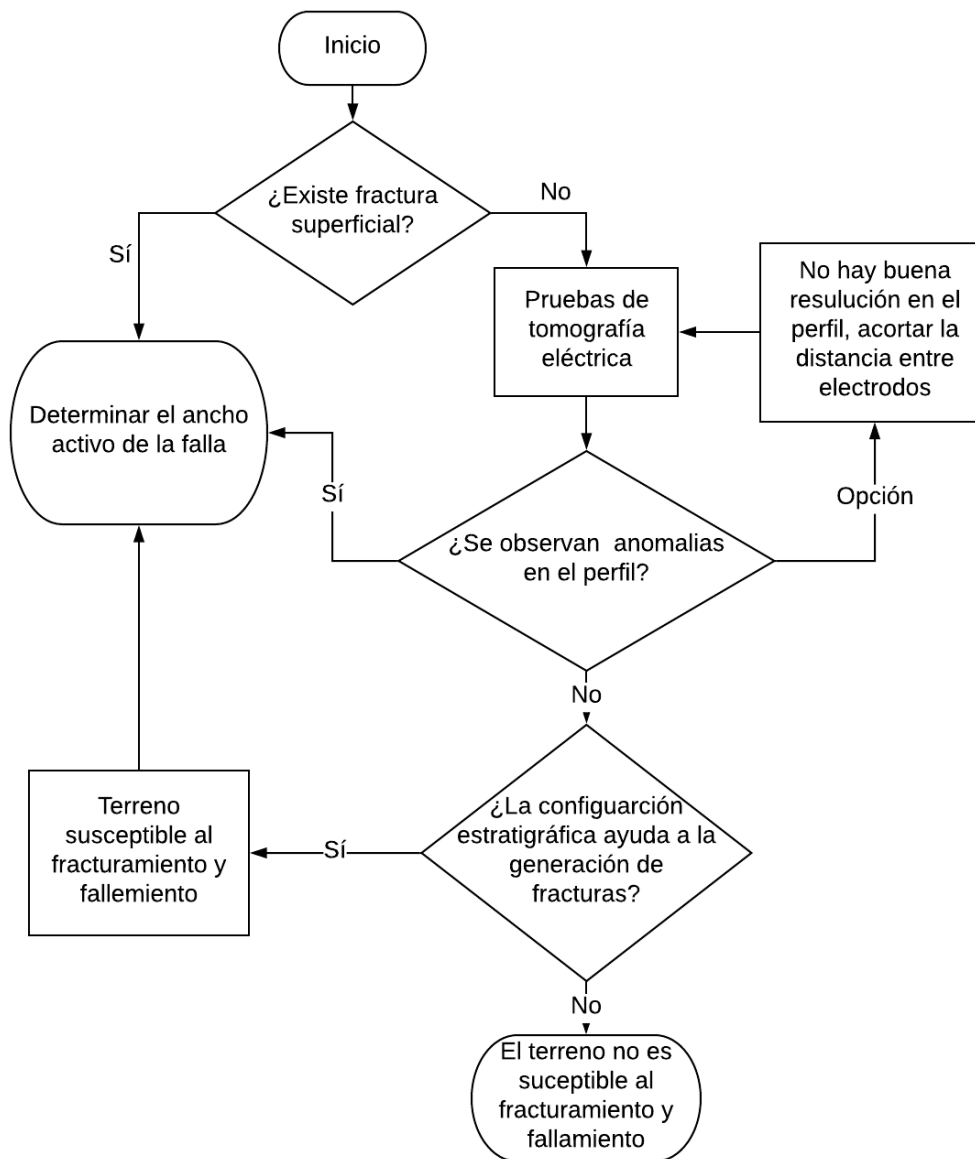


Figura 7.1 Diagrama de flujo para la determinación de la susceptibilidad al fracturamiento y la zona activa de las falla

## 7.2 Conclusiones particulares

La obtención de perfiles de tomografía eléctrica resistiva es de mayor utilidad para la determinación de estratigrafía hasta una profundidad de 40 metros.

El método de refracción sísmica muestra excelentes resultados para la determinación de la zona de influencia de la falla.

Las características del suelo del valle de Aguascalientes son muy variadas desde 5 hasta 300 ohm-metro, los resultados encontrados se muestran en el la Figura 6.9.

Las variables estratigráficas que pueden ayudar a la generación de fracturas son: Estratigrafía con protuberancias, Discontinuidades asociadas con el nivel freático, fuertes cambios de pendiente en el basamento, pendientes suaves a la orilla del valle, variaciones verticales en los estratos, reactivación de falla sepultada con rellenos durante la formación del valle y reactivación de paleocauces.

## 7.3 Nichos de Investigación

Realizar una caracterización de valores de resistividad utilizando un mayor número de pruebas, y materiales de diferentes lugares dentro del valle de Aguascalientes, de esta forma hacer la muestra de mayor confiabilidad.

Realizar mediciones en las zonas estudiadas con diferentes métodos geofísicos. Principalmente el método de reflexión sísmica para obtener información a una mayor profundidad.

Establecer una zona de prueba; con la nueva información y la metodología mostrada en esta investigación, realizar una zonificación para la susceptibilidad al fracturamiento y fallamiento del terreno.

Realizar una modelación con datos obtenidos mediante pruebas geofísicas y compararla con el mapa elaborado.

## 8 REFERENCIAS

---

- Adegbola RB, Ayolabi EA, Allo W (2013) Subsurface characterization using seismic refraction and surface wave methods: a case of Lagos State University, Ojo, Lagos State. *Arab J Geosci* 6:4925–4930. doi: 10.1007/s12517-012-0784-2
- Budhu M (2008) Mechanics of Earth Fissures Using the Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Environ Eng Geosci* XIV: 281–295
- Budhu M, Adiyaman IB (2009) Mechanics of land subsidence due to groundwater pumping. *Int J Numer Anal Methods Geomech* 34:1459–1478. doi: 10.1002/nag.863
- Burbey TJ (2002) The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *ResearchGate* 10:525–538. doi: 10.1007/s10040-002-0215-7
- Chaussard E, Wdowinski S, Cabral-Cano E, Amelung F (2014) Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sens Environ* 140:94–106. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.038
- El-Hussain I, Mohamed AME, Deif A, Al-Rawas G, Al-Jabri K, Pekman G (2014) Delineation of a paleo-channel utilizing integrated geophysical techniques at the port of duqm area, sultanate of oman. *J Geophys Eng* 11:055005. doi: 10.1088/1742-2132/11/5/055005
- Ferrill DA, Morris AP, McGinnis RN, Smart KJ, Wigginton SS, Hill NJ (2017) Mechanical stratigraphy and normal faulting. *J Struct Geol* 94:275–302. doi: 10.1016/j.jsg.2016.11.010
- Galloway DL, Burbey TJ (2011) Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol J* 19:1459–1486. doi: 10.1007/s10040-011-0775-5
- Groves P, Cascante G, Dundas D, Chatterji P k. (2011) Use of geophysical methods for soil profile evaluation. *Can Geotech J* 48:1364–1377. doi: 10.1139/t11-044
- Helm DC (1994a) Hydraulic force that play in generatig fissures at depth. *Bull Assoc Eng Geol* 31:292–302
- Helm DC (1994b) Horizontal aquifer movement in a Theis-Thiem confined system. *Water Resour Res* 30:953–964
- Hernández-Marín M, Burbey TJ (2010) Controls on initiaion and propagation of pumping-induce earth fissures: insights from numerical simulation. *Hydrogeol J* 18:1773–1785. doi: 10.1007/s10040-010-0642-9

- Hernández-Marín M, González-Cervantes N, Pacheco-Martínez J (2015) Discussion on the origin of surface failures in the Valley of Aguascalientes, México. *Proc Int Assoc Hydrol Sci* 372:235–238. doi: 10.5194/piahs-372-235-2015
- Hu B, Zhou J, Wang J, Chen Z, Wang D, Xu S (2009) Risk assessment of land subsidence at Tianjin coastal area in China. *ResearchGate* 59:269–276. doi: 10.1007/s12665-009-0024-6
- Huang B, Shu L, Yang YS (2012) Groundwater Overexploitation Causing Land Subsidence: Hazard Risk Assessment Using Field Observation and Spatial Modelling. *ResearchGate* 26. doi: 10.1007/s11269-012-0141-y
- Imposa S, De Guidi G, Grassi S, Scudero S, Barreca G, Patti G, Boso D (2015) Applying geophysical techniques to investigate a segment of a creeping fault in the urban area of San Gregorio di Catania, southern flank of Mt. Etna (Sicily — Italy). *J Appl Geophys* 123:153–163. doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.10.008
- Instituto Mexicano del Transporte (2003) Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil. Sanfandilla, Queretaro
- Iodice M, Muggleton J, Rustighi E (2016) The Detection of Vertical Cracks in Asphalt Using Seismic Surface Wave Methods. *J Phys Conf Ser* 744:012059. doi: 10.1088/1742-6596/744/1/012059
- Larson MK (1987) Potential for subsidence fissuring in the Phoenix Arizona USA area. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr* 24:291–299. doi: 10.1016/0148-9062(87)92290-X
- Larson MK, Pewe TL (1986) Origin of Land Subsidence and Earth Fissuring, Northeast Phoenix, Arizona. *Environ Eng Geosci* xxiii:139–165 . doi: 10.2113/gseegeosci.xxiii.2.139
- Lowrie W (2007) *Fundamentals of Geophysics, Second*. Cambridge University Press
- Pacheco-Martínez J, Arzate J, Rojas E, Arroyo M, Yutsis V, Ochoa G (2006) Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Eng Geol* 84:143–160. doi: 10.1016/j.enggeo.2005.12.003
- Pacheco-Martínez J, Hernandez-Marín M, Burbey TJ, González-Cervantes N, Ortiz-Lozano JA, Zermeno-de-León ME, Solís-Pinto A (2013) Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Eng Geol* 164:172–186. doi: 10.1016/j.enggeo.2013.06.015
- Pueyo Anchuela Ó, Lafuente P, Arlegui L, Liesa CL, Simón JL (2016) Geophysical characterization of buried active faults: the Concul Fault (Iberian Chain, NE Spain). *Int J Earth Sci* 105:2221–2239. doi: 10.1007/s00531-015-1283-y

- Sass O (2007) Bedrock detection and talus thickness assessment in the European Alps using geophysical methods. *J Appl Geophys* 62:254–269. doi: 10.1016/j.jappgeo.2006.12.003
- Sauret ESG, Beaujean J, Nguyen F, Wildemeersch S, Brouyere S (2015) Characterization of superficial deposits using electrical resistivity tomography (ERT) and horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) geophysical methods: A case study. *J Appl Geophys* 121:140–148. doi: 10.1016/j.jappgeo.2015.07.012
- Schmidt V (2010) Clasificación de suelos basada en el cálculo de razones espectrales en sitios donde se ubican estaciones acelerográficas de América Central. Casos de El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. *Rev Geológica América Cent* 0. doi: 10.15517/rgac.v0i44.3443
- Sheng Z (2003) Mechanisms of Earth Fissuring Caused by Groundwater Withdrawal. *Environ Eng Geosci* 9:351–362. doi: 10.2113/9.4.351
- Slaff S (1993) Land subsidence and earth fissures in Arizona
- Youssef A, Sabtan A. A, Maerz H. N, Zabramawi A. Y (2014) Earth Fissures in Wadi Najran, Kingdom of Saudi Arabia. *Nat Hazards* 71:2013–2027. doi: 10.1007/s11069-013-0991-5
- Zainal M, Yanis M, Muksin U, Ismail N (2017) Investigation of Shallow Paleochannel in Banda Aceh based on Electrical Resistivity Tomography. *J Aceh Phys Soc* Vol 6 Iss 1 Pp 1-5 2017 1
- Zhang Y, Wang Z, Xue Y, Wu J, Yu J (2016) Mechanisms for earth fissure formation due to groundwater extraction in the Su-Xi-Chang area, China. *Bull Eng Geol Environ* 75:745–760. doi: 10.1007/s10064-015-0775-0