



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA  
División de Ciencias de la Tierra

***CARACTERIZACIÓN DE FALLAS SOMERAS EN LA CIUDAD  
DE AGUASCALIENTES  
A TRAVÉS DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE***

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO GEOFÍSICO**

P R E S E N T A :

**GARCÍA PÉREZ LETICIA**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. ENRIQUE CABRAL CANO**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D.F., 2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**SRITA. LETICIA GARCÍA PÉREZ**

**Presente**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN  
60-I-884**

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Enrique Cabral Cano y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geofísico:

**CARACTERIZACIÓN DE FALLAS SOMERAS EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES, POR MEDIO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE**

**RESUMEN**

- I MARCO CONCEPTUAL**
  - II ÁREA DE ESTUDIO**
  - III FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN CON GPR**
  - IV PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MÉTODO DE GPR**
  - V ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**
  - VI INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**
  - VII CONCLUSIONES**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar del informe el título de éste

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

CD. Universitaria, D. F., a 5 de Agosto de 2009

EL DIRECTOR

**MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA**

**JGGZ\*RPYS\*srs**

## **AGRADECIMIENTOS**

En principio quisiera agradecer a todas las personas que han estado a mi lado y que han ayudado de alguna u otra manera como lo son profesores, familiares, amigos.

Pero en específico y bien merecido un agradecimiento:

Al Instituto de Geofísica y quedo especialmente agradecida a mi director de tesis, el Dr. Enrique Cabral Cano, que me ha ayudado y apoyado en cada momento. Ha corregido minuciosamente y me ha dado la posibilidad de mejorarlo.

Agradezco de todo corazón por todos sus conocimientos, direcciones, correcciones y sugerencias con las que he podido elaborar una adecuada memoria de todo el trabajo al M.C. Oscar Díaz Molina.

Mi más sincero agradecimiento a la Dra. Claudia Arango por todos sus comentarios, sugerencias y cuestiones, pero sobre todo por ofrecerme todo su apoyo en cada momento.

Mis agradecimientos al Ing. Del Valle Toledo, Ing. Alejandro Arroyo y al Ing. Gerardo Cifuentes por todas sus correcciones y comentarios en la realización de esta tesis.

A mi madre y mi padre por su apoyo en todo momento, su amor incondicional, por sus buenos consejos y por transmitir las ganas de trabajar y por estar siempre allí para ayudarme en toda mi vida.

A mis hermanos Rita, Marisela y Armando que me han cuidado y por los buenos tiempos que hemos estado juntos.

También quiero expresar mis agradecimientos a mis grandes amigos Mireya, Efraín, Yopez, Charolas, Javi, Laura, Jósela, Alejandra y a todos mis amigos dentro y fuera de la universidad, y a todos los que se me olvidaron y deberían estar aquí.

## ÍNDICE GENERAL

	CONTENIDO	PÁGINA
I	MARCO CONCEPTUAL	1
I.1	Fallamiento en la zona metropolitana de Aguascalientes	3
II	AREA DE ESTUDIO	9
II.1	Localización, Población y Extensión	9
II.2	Clima	11
II.3	Provincias fisiográficas	11
II.4	Geología de la ciudad de Aguascalientes	12
III	Fundamentos de la prospección con GPR	20
III.1	Propiedades electromagnéticas de las rocas	20
III.2	Principios básicos del GPR	28
IV	Principios básicos del método del GPR	39
IV.1	Descripción del equipo de GPR GSSI SIR-3000	39
IV.2	Funcionamiento de un sistema de GPR	42
IV.4	Modo de adquisición de datos	44
IV.5	Procesamiento	46
V.	Adquisición y procesamiento de los datos	65
V.1	Adquisición de datos	65
V.2	Procesamiento de datos	72
VI	Interpretación y Resultados	76
VI.1	Resultados de los perfiles adquiridos	76
VI.2	Análisis de discontinuidades	107
VII	Conclusiones	111
	Bibliografía	114

***CARACTERIZACIÓN DE FALLAS SOMERAS EN LA CIUDAD  
DE AGUASCALIENTES  
A TRAVÉS DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE***

**RESUMEN**

El Estado de Aguascalientes desde los años ochentas empezó a sufrir problemas de fracturamiento y subsidencia. En el 2008 se realizaron estudios de GPR con la finalidad de caracterizar fallas geológicas activas y no activas en la zona Metropolitana de la ciudad de Aguascalientes. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con la aplicación Radar de Penetración Terrestre (GPR), en la zona Metropolitana de la ciudad de Aguascalientes, para cartografiar las fallas existentes en el municipio y que causan daños a la infraestructura urbana de la ciudad. La adquisición de los datos se realizó en cuatro localidades sobre superficie terrestre, a lo largo de las calles, en este trabajo se presenta 18 perfiles utilizando antenas de 70 y 200 MHz y posteriormente procesados e interpretados, el GPR mostró buena resolución de las estructuras del subsuelo en esta zona urbana, en la mayoría de los casos, las imágenes de radar permitieron visualizar la estratificación del terreno en el caso de capas sedimentarias y la ubicación y geometría de las fallas que afectan la zona en estudio, por lo que fue posible realizar sobre los perfiles adquiridos, una interpretación muy similar a la realizada directamente sobre la superficie. Los resultados llevaron a la elaboración de un mapa con la distribución y continuidad de las fallas en el municipio de Jesús María, permitiendo definir su área de influencia incluyendo aquellas fallas donde no presenta aún una expresión en superficie.

**CAPÍTULO I**  
**MARCO CONCEPTUAL**

Los procesos geodinámicos que afectan a la superficie terrestre dan lugar a movimientos en el terreno de diferente magnitud y características, que pueden construir riesgos geológicos, que afectan a las actividades humanas (Tabla 1.1). Fenómenos tan variados como la erosión, movimientos sísmicos y erupciones volcánicas, pueden causar deslizamientos de laderas, hundimientos o subsidencia, por mencionar algunos fenómenos. Estos fenómenos son el reflejo del carácter dinámico del medio geológico de la evolución natural del relieve, y también es provocado por el hombre, al alterar sus condiciones originales.

**Tabla 1.1. Procesos Geológicos y meteorológicos que pueden causar riesgos (González, 2002)**

<b>Procesos</b>	<b>Fenómenos que causan riesgos</b>
Procesos geodinámicos externos	-Desplazamiento y deslizamiento -Hundimiento y subsidencias -Erosión -Expansividad y colapsabilidad de suelos
Procesos geodinámicos internos	-Terremotos y tsunamis -Vulcanismo -Diapirismo
Procesos meteorológicos	-Lluvias torrenciales y precipitaciones intensas -Inundaciones y avenidas de agua -Procesos de arrollada -Huracanes -Tornados

Los problemas derivados de la doble interacción entre el medio geológico y las actividades humanas que generan riesgos para la salud, la vida y el medio ambiente, son el resultado de la acción de las fuerzas propias del planeta. Estas fuerzas incontrolables por el hombre hace necesario el planteamiento de

## CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL

decisiones adecuadas para conseguir un equilibrio entre las condiciones naturales y la ocupación del territorio, incorporando los métodos de prevención.

Uno de los riesgos geológicos que se presentan en algunas áreas urbanas son los derivada de la sobre explotación de acuíferos. En México, la mayor parte de las ciudades afectadas por el fenómeno de agrietamiento, se encuentran localizadas en la zona centro del país (Valle de México, Querétaro, Morelia, Aguascalientes, Celaya, etcétera). Su ubicación, dentro de valles y cuencas que propiciaron el depósito de materiales aluviales generando suelos fértiles que favorecieron el desarrollo urbano.

Debido al ritmo creciente al que se explotan las aguas subterráneas en estas ciudades, se han acelerado los fenómenos de consolidación de suelos y subsidencia. Si el relleno sedimentario se depósito sobre un basamento con irregularidades importantes de calidad de suelo, es más factible el proceso de consolidación es conducente al desarrollo intenso de fracturamiento y fallamiento del subsuelo. Las ciudades que presentan este fenómeno han sufrido por décadas problemas de subsidencia, dañando viviendas, drenajes, calles, carreteras, etcétera, provocado por las fracturas y fallas que son la expresión superficial de la explotación desmedida de los acuíferos que abastecen a estas ciudades.

Desde hace varias décadas se ha relacionado el desarrollo de fracturas y fallas en zonas urbanas ubicadas en valles con alto nivel de extracción de agua subterránea, como es el caso de nuestra zona de estudio: la zona Metropolitana de Aguascalientes. Sin embargo, la evolución de las fracturas y fallas está condicionada principalmente por las interacciones de factores geológicos e hidromecánicos de los sedimentos; la consolidación mecánica de los sedimentos limo-arcillosos que rellenan el valle se manifiesta en la superficie como subsidencia. La deformación intensa de suelos puede llevar a su fracturamiento debido a la extracción de agua subterránea que pueden ser estimados a partir de



la correlación entre la comprensibilidad, plasticidad, granulometría y permeabilidad de los diferentes materiales que integran la secuencia lacustre (Martínez, 2004).

### **I.1 Fallamiento en la zona metropolitana de Aguascalientes**

La presencia de fracturas y fallas en la zona urbana de la ciudad de Aguascalientes se conoce desde la década de los ochentas (Aranda-Gómez, 1986); los hermanos Aranda en el año de 1985 desarrollaron un estudio del agrietamiento y subsidencia de la Ciudad de Aguascalientes, en donde se refiere que a partir de 1981 se comenzaron a reportar en Aguascalientes la aparición de grietas en el subsuelo que causaban daños a la infraestructura urbana. Estas grietas se repararon pero poco tiempo después reaparecieron, y crecieron en número, longitud y magnitud.

Para el año de 1985, con la colaboración del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México y la Universidad Autónoma de Aguascalientes, se emprendió una investigación con la finalidad de establecer el origen de las grietas. Los resultados arrojaron que uno de los rasgos más notables de estas fallas, era que todas estaban presentes dentro del relleno aluvial y tenían una orientación burdamente paralela a los márgenes del valle de Aguascalientes. Además, en todas las fallas que en ese momento se conocían, se encontraba orientado hacia el eje del valle (Río San Pedro). Con todos estos elementos se propuso como hipótesis de trabajo que las grietas podían ser de origen tectónico. Alternativamente existía la posibilidad que el agrietamiento pudiese ser causados por la sobreexplotación de acuíferos y por último el fenómeno podía ser causado por el movimiento en masa de material no consolidado (creep).

Para el estudio del fenómeno se cartografiaron las fracturas y fallas hasta entonces conocidas y se concluyó que todas las grietas son subparalelas, con orientación norte-sur, el bloque hundido en la margen derecha del Río San Pedro

## CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL

es hacia el oeste y el bloque hundido en la margen izquierda es hacia el este, y el buzamiento de las grietas es vertical (Figura 1.1).

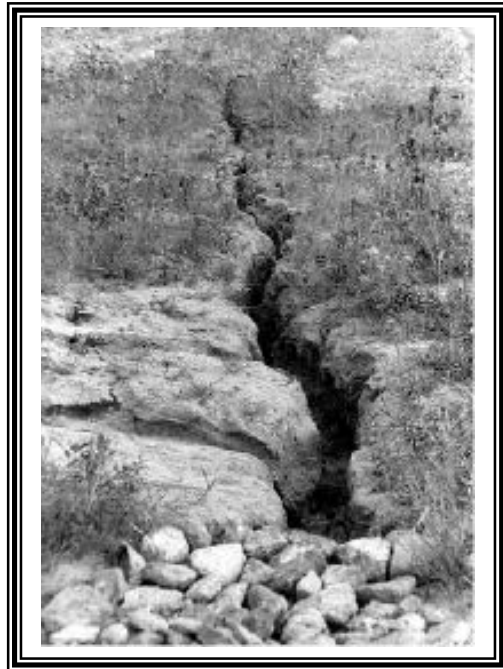


Figura 1.1. Fotografía de la falla que atraviesa el San Pedro (Tomada del Universal, Diciembre del 2000)

Aranda en el año de 1986 concluye que, "El Valle de Aguascalientes es una fosa tectónica formada después del Oligoceno Medio. Pensamos que la estructura influye pasivamente en la orientación del agrietamiento reflejando el basamento del valle".

Siguiendo la misma línea, un estudio posterior Aranda Gómez (1991) afirma que: "Nuestra conclusión, un tanto arbitraria, es que el agrietamiento del valle tiene su origen en los abatimientos del nivel freático; el patrón geométrico de las fallas inducidas está controlado por la forma del lecho rocoso subyacente, consecuentemente por la estructura tectónica (Aranda Gómez, 1991)".

De 1995 a la fecha, las fallas han modificado la geografía de nueve de los once municipios del Estado de Aguascalientes y puesto en alerta a la población y a las autoridades, ya que desde entonces se han demolido 130 viviendas y varias decenas

## CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL

han sido deshabitadas o modificadas (Figura 1.2) por las grietas que presentan (Atlas de Riesgos de Estado de Aguascalientes, 2003). El Atlas de Riesgos indica que hasta 1999 en todo el estado existían 29 mil 335 viviendas potencialmente afectadas por la presencia de agrietamientos en el suelo lo que se ha complicado debido a la sobreexplotación de los mantos acuíferos y al aspecto sísmico.



Figura 1.2. Ejemplos, casas y edificios afectados por el agrietamiento en el subsuelo, las flechas rojas indican las zonas de afectación por las fallas.

En el municipio existen dos grandes fracturas: la falla del Río San Pedro, en el poniente, y otra en el oriente; además de Aguascalientes capital (donde residen unas 750 mil personas, 78 por ciento de la población total de la entidad), los demás municipios afectados son San Francisco de los Romo, Rincón de Romo, Jesús María, Calvillo y Cosío, mientras que en menor medida Pabellón de Arteaga y Tepezalá, en

## CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL

los que la Coordinación de Protección Civil Estatal tiene localizadas más de 300 viviendas con afectaciones en su construcción.

La sobreexplotación de los mantos acuíferos ha provocado que el crecimiento de las fallas afecte severamente muchas casas habitación, llegando en ocasiones al colapso. Esta situación se presenta principalmente en colonias populares como La Estrella, Versailles segunda sección, Ortega Douglas, Bona Gens, Gómez Portugal, Jesús Terán y San Marcos, además de otras de clase media alta como Del Valle y El Dorado y de clase alta como Campestre y Jardines de la Asunción.

Este factor es importante porque hace seis años se extraían anualmente 586 millones de metros cúbicos de agua subterránea (INAGUA, 2005), que es la única fuente de abastecimiento, y donde la recarga límite a través de la lluvia es de 300 millones  $m^3$  es con lo cual se presenta un déficit de 286 millones de  $m^3$ . Por varias décadas el agua subterránea cubrió las necesidades de los ámbitos agrícola e industrial. En la actualidad, existen zonas como la porción oriente de la Ciudad de Aguascalientes donde se ha medido un abatimiento superior a 110 metros de profundidad (Álvarez, 2001).

Si bien el fallamiento superficial se comenzó a manifestar hace más de veinte años, este fenómeno fue aceptado oficialmente en el mes de octubre de 1995, con la elaboración de las Cartas Urbanas de Grietas y Fallas de la Ciudad de Aguascalientes, que editó su Ayuntamiento. Estas cartas se han actualizado, para mantener monitoreadas las fallas de esta capital, como se muestra en la figura 1.3. Las Cartas Urbanas de Grietas y Fallas de la Ciudad de Aguascalientes, (SIDIFAG), ha permitido observar la evolución de las fallas. Los mapas de SIDIFAG del 2005 al 2007, mostraron el desarrollo de las fallas y grietas en la zona Metropolitana de la Ciudad de Aguascalientes y sus alrededores, principalmente en aquellas zonas donde el desarrollo urbano ha crecido por la demanda de vivienda y se han construido fraccionamientos.

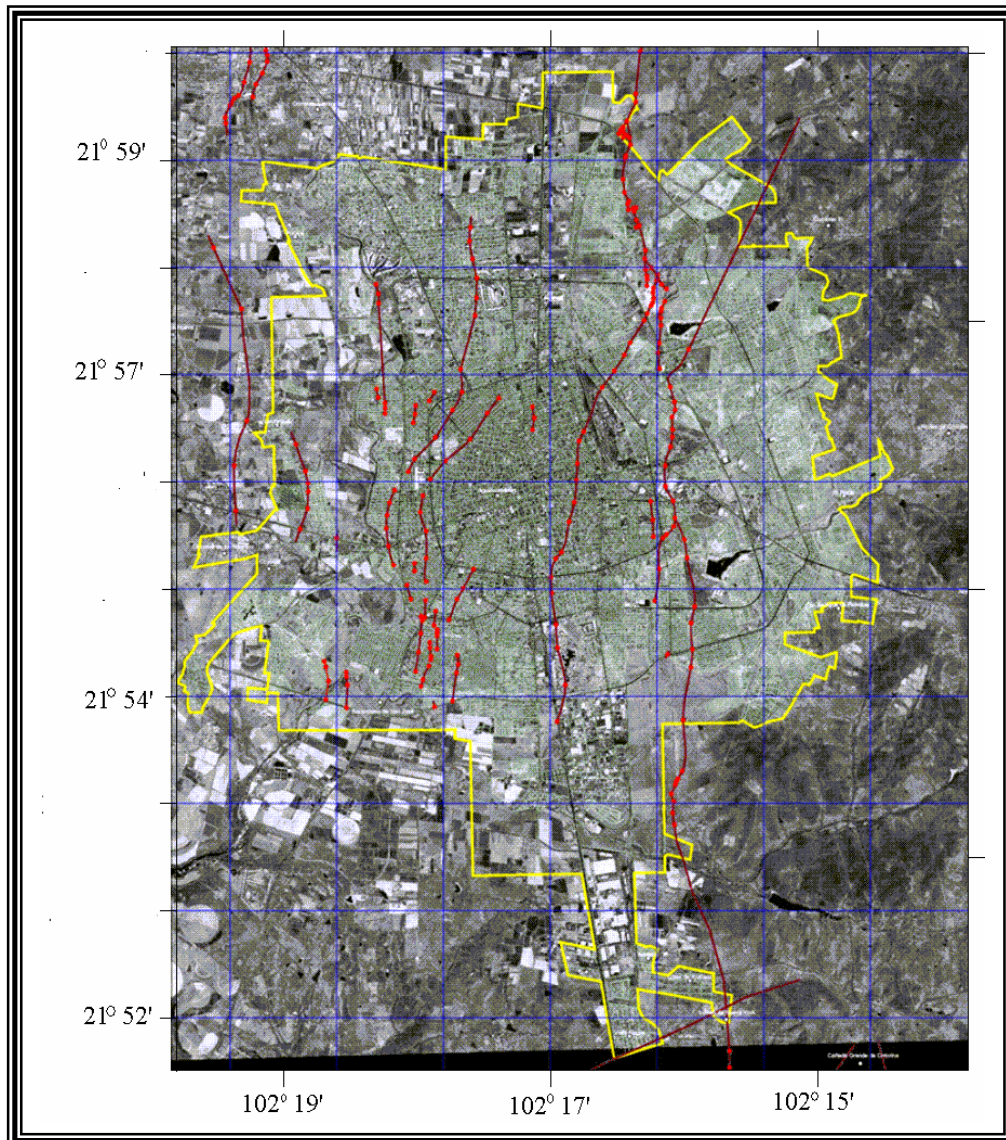


Figura 1.3. Fallas y grietas (líneas en rojo) que afectan a la Ciudad de Aguascalientes (SIDIFAG, 2005)

Un ejemplo claro, las grietas y fallas de la ciudad de Jesús María, es un caso claro de la evolución que se manifiestan una clara extensión hacia nuevas colonias y fraccionamientos. Estudios reportados en la literatura (Arroyo y *González Treviño Guillermo, 2003*) han demostrado la utilidad de algunas técnicas geofísicas para estudiar estas fallas, como pueden ser tales como son los métodos potenciales, sísmicos y sondeos eléctricos entre otros. Estas

## CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL

herramientas han permitido evaluar las condiciones estructurales del subsuelo en zonas específicas del valle de Aguascalientes, cuyos resultados han sido útiles en la elaboración de modelos analíticos de subsidencia, que permiten determinar escenarios tanto de la magnitud de los hundimientos como la ubicación de las zonas de riesgos de agrietamiento (Sótelo, 2004). Sin embargo, a la fecha estos ejercicios solo se pueden hacer parcialmente debido a la limitada cantidad de datos disponibles. Desde 1997, geólogos de las universidades de Querétaro y del Instituto de Geología de (UNAM), instalaron tres sismógrafos en la periferia del municipio de Aguascalientes, el más dañado de los once que conforman el estado de Aguascalientes. Se tiene el conocimiento de que existen grietas con hasta 40 kilómetros de extensión y 700 metros de profundidad (Sótelo, 2004). Para explicar el origen del fracturamiento se acepta la tesis de que las fallas son producto de una sobreexplotación de los mantos acuíferos y eventos tectónicos derivada de un proceso de consolidación inducido.

En el presente trabajo se elaboró un mapa caracterizando las principales fracturas en la zona metropolitana de Aguascalientes, a una escala 1: 50,000. A partir de este mapa se detectaron y se describieron fallas someras del subsuelo a través de secciones de Radar de Penetración Terrestre (GPR). Esta técnica resultó muy útil porque permite reconocer estructuras del subsuelo, se pueden delinear rasgos naturales como fallas, fracturas y otras estructuras como cavidades, además de otras estructuras civiles y de infraestructura subterránea. Con esta información se han podido definir y realizar mapas de peligro geológicos para delinear las zonas más afectadas. Esto, esto conlleva también al uso de técnicas de geodesia satelital como el GPS, y la cartografía digital, que por ser de fácil manejo y eficiente localización permite la exportación de información con otros productos informáticos.

## **CAPÍTULO II**

### **ÁREA DE ESTUDIO**

Con el objetivo de identificar el marco físico de la Ciudad de Aguascalientes y áreas conurbanas, en el presente capítulo describe la localización geográfica, población y extensión de la entidad y sus características climáticas, fisiográficas y geológicas. Estudios anteriores (Mitre y Arroyo, 2004) han demostrado que para entender el fenómeno de subsidencia y su manifestación superficial en forma de fracturamiento y fallamiento superficial, se requiere primero conocer la geología de la zona en donde estos ocurren, debido a la estrecha relación que tienen con la estructura del subsuelo.

#### **II.1 Localización, Población y Extensión**

El Estado de Aguascalientes, se encuentra ubicado en la región centro-norte del país, con una población de 943,506 habitantes (INEGI, 2007), pequeño en su extensión territorial pero con un gran desarrollo económico. Su capital, la Ciudad de Aguascalientes se localiza entre los 21°45' y 22°06' de latitud de norte y entre los 102°00' y 102°25' de longitud Oeste, en la porción central de la República Mexicana. La Ciudad de Aguascalientes, concentra el 75% de la población, ocupa una superficie territorial de 200 Km<sup>2</sup> y colinda con los municipios Jesús María, Pabellón De Arteaga, Rincón de Romos, San José García y Tepezalá (Figura 2.1). El área de estudio donde se realizó el estudio de Radar de Penetración Terrestre (GPR), se ubica en el noroeste de la zona Metropolitana de la Ciudad de Aguascalientes, se localiza en las coordenadas 10°20'21" y 21°05'08", a una altura de 1,880 metros sobre el nivel del mar, zona que nos ocupa para su estudio se observa en la figura 2.1 (recuadro de color rojo), zona donde se realizaron las secciones de GPR, y está comprendida por las colonias Martínez Andrade, Benigno Chávez, La Loma, los fraccionamientos Lomas del Valle y Lomas de Jesús María.





En infraestructura tiene excelentes vías de comunicación: una red de carreteras estatales, troncales, federales de 2,296 Km y caminos rurales; la red ferroviaria estatal cuenta con una longitud de 202 Km; y un aeropuerto internacional en la Ciudad de Aguascalientes.

## **II.2 Clima**

El clima predominante es de tipo estepario con una temperatura media anual de 17° C, la Ciudad de Aguascalientes, según la clasificación de Koppen adaptada a la República Mexicana, pertenece al grupo climático semiseco (CNA, 2007). La entidad recibe una lluvia media anual de 531 milímetros (mm), que varía desde 400 mm en la porción nororiental, hasta más de 700 mm en la zona occidental, con precipitaciones medias mensuales de 100 mm en julio y agosto, que son los meses de mayor precipitación, e inferior a los 20 mm en los meses del estiaje que dura de noviembre a mayo. La evaporación potencial media anual es de 2,477 mm, la media mensual de 205 mm y la máxima mensual de 302 mm en mayo, con base en los registros climatológicos correspondiente al periodo de 2004 a 2007 (Servicio Meteorológico Nacional, 2009).

## **II.3 Provincias Fisiográficas**

La Ciudad de Aguascalientes se ubica dentro del valle del mismo nombre, el cual se localiza dentro de dos provincias fisiográficas importantes. La porción oriental queda incluida dentro de la Mesa Central, mientras que el flanco occidental pertenece a las estribaciones de la Sierra Madre Occidental, este sistema inicia en la frontera con los Estados Unidos, tiene dirección NW-SE, limitada al sur con la provincia de la faja Neovolcánica, al oeste con las provincias del desierto Sonorense y Llanura Costera del Pacífico y al este con la provincia de Sierras y la extensión occidental de la Mesa Central y Sierra Madre Oriental. Hacia el oriente, la Sierra Madre Occidental está constituida por valles y sierras alargadas de orientación NW-SE, y NE-SW. Esta provincia dentro del estado de Aguascalientes

está representada por la subprovincia de Sierras y Valles Zacatecanos, la cual se localiza al oeste abarcando cerca de 2,635 Km<sup>2</sup> del Estado y comprendiendo los municipios de Calvillo y San José de Gracia, y parte de los de Aguascalientes, Cosío, Jesús María, Pabellón de Arteaga y Rincón de Romos, con drenaje predominante a través de valles.

La única provincia de la Mesa Central que penetra en el Estado de Aguascalientes es la de los Llanos de Ojuelos, la cual ocupa el extremo este del Estado con 2,332 Km<sup>2</sup> incluyendo los municipios de El Llano, Tepezalá y Asientos totalmente, y en parte los municipios de Jesús María, Pabellón de Arteaga, Rincón de Romos y San Francisco de los Romo (Mitre, 2003). Se caracteriza por presentar llanos extensos, situados entre 2,000 y 2,050 msnm, de pisos consolidados y cubiertos sólo por una capa muy somera de aluviones. Existen dos llanos de este tipo: el de Ojuelos (que Aguascalientes comparte con Jalisco y Guanajuato) y el de Aguascalientes que se extiende hacia al oriente de esta ciudad. Entre ellos se encuentra un grupo de mesetas muy disectadas, la mayoría de cuyas superficies está entre 2,300 y 2,350 msnm. Hay también algunos picos como el cerro El Espía, que alcanza 2,600 m de altitud. El municipio de Jesús María, pertenece a la provincia de la Mesa Central y se caracteriza por contar con zonas accidentadas que abarcan un 25% de su superficie, localizada en la parte noreste y sur. Las zonas de semiplanas cubren un 45% en la parte noreste, oeste y sur y las zonas planas representan el 30% restante y se localizan al norte y noreste del municipio (CNA, 2009).

#### **II.4 Geología de la ciudad de Aguascalientes**

La Ciudad de Aguascalientes se asienta sobre una estructura tectónica conocida como Graben de Aguascalientes, atravesando de Norte a Sur al Estado de Aguascalientes. Morfológicamente constituye una depresión topográfica alargada y orientada norte-sur (Figura 2.2) conocida como el valle de Aguascalientes. Las dimensiones de este valle son de 20 Km de anchura máxima en sus extremos

norte y sur, cerca de 10 Km de ancho mínimo en su parte central, que fue rellenadas por lavas y materiales granulares depositados en un medio acuoso.

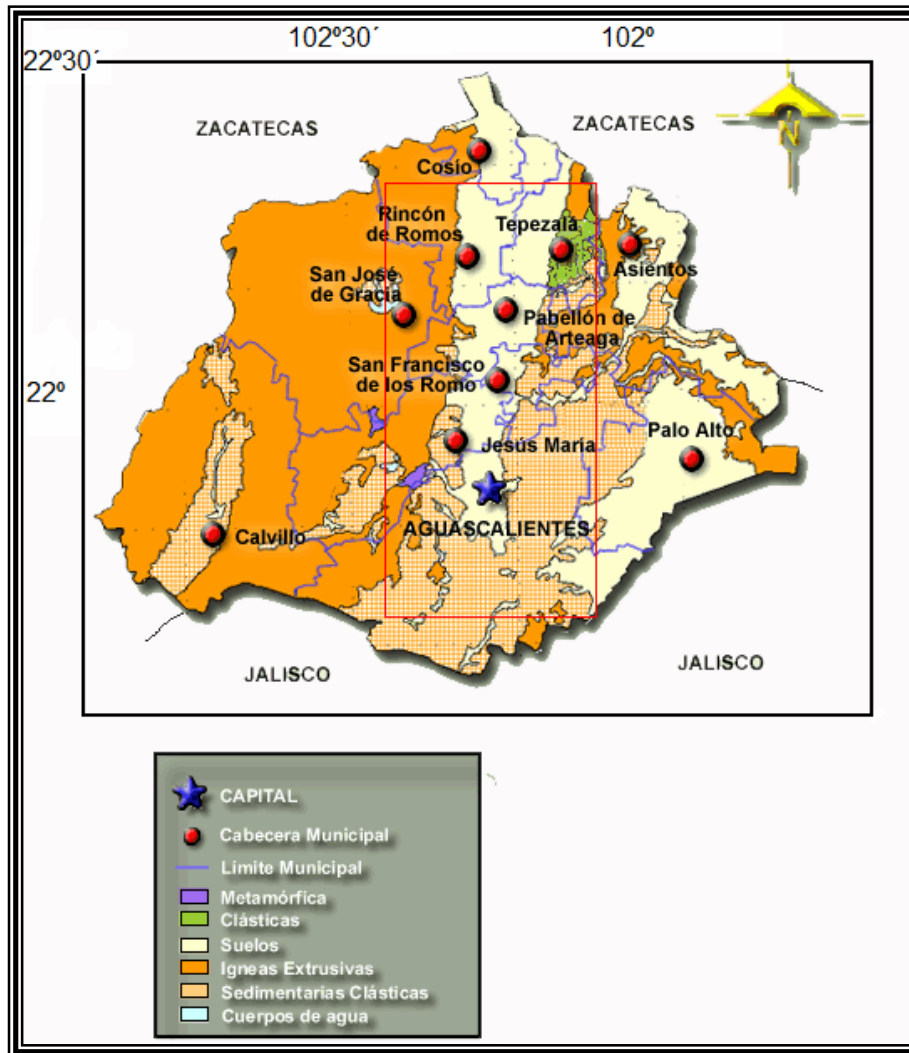


Figura 2.2 Graben de Aguascalientes (Tomado INEGI, 2008)

### II.4.1 Geología general

El marco geológico de la entidad está formado por rocas ígneas y sedimentarias del Triásico al Cuaternario. Las más antiguas son las rocas sedimentarias de origen marino, incluyendo lutitas y limonitas, que afloran en el flanco oriental de la Sierra Madre Occidental; predominan en las sierras y lomeríos del Estado. Las

## CAPÍTULO II. ÁREA DE ESTUDIO EN LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES

rocas ígneas de composición ácida, como tobas, riolitas e ígmbritas (Figura 2.3), proceden del Terciario, en tanto que la parte superior de los rellenos de los valles, está constituida por depósitos aluviales del Cuaternario. En el área de Tepezalá, donde se encuentra un afloramiento de las calizas cretácicas plegadas y mineralizadas, que forman el basamento de la secuencia volcánica y sedimentaria continental, está expuesto también localmente el intrusivo granítico de edad Terciaria, que levantó y mineralizó las mencionadas calizas (Aranda, 1989). Por otro lado, la secuencia de los sedimentos lacustres, consiste fundamentalmente de una sucesión de areniscas y tobas lacustres con variaciones en su nivel de consolidación. Aparecen también algunos niveles conglomeráticos intercalados que constituyen los acuíferos locales (González, 2003).

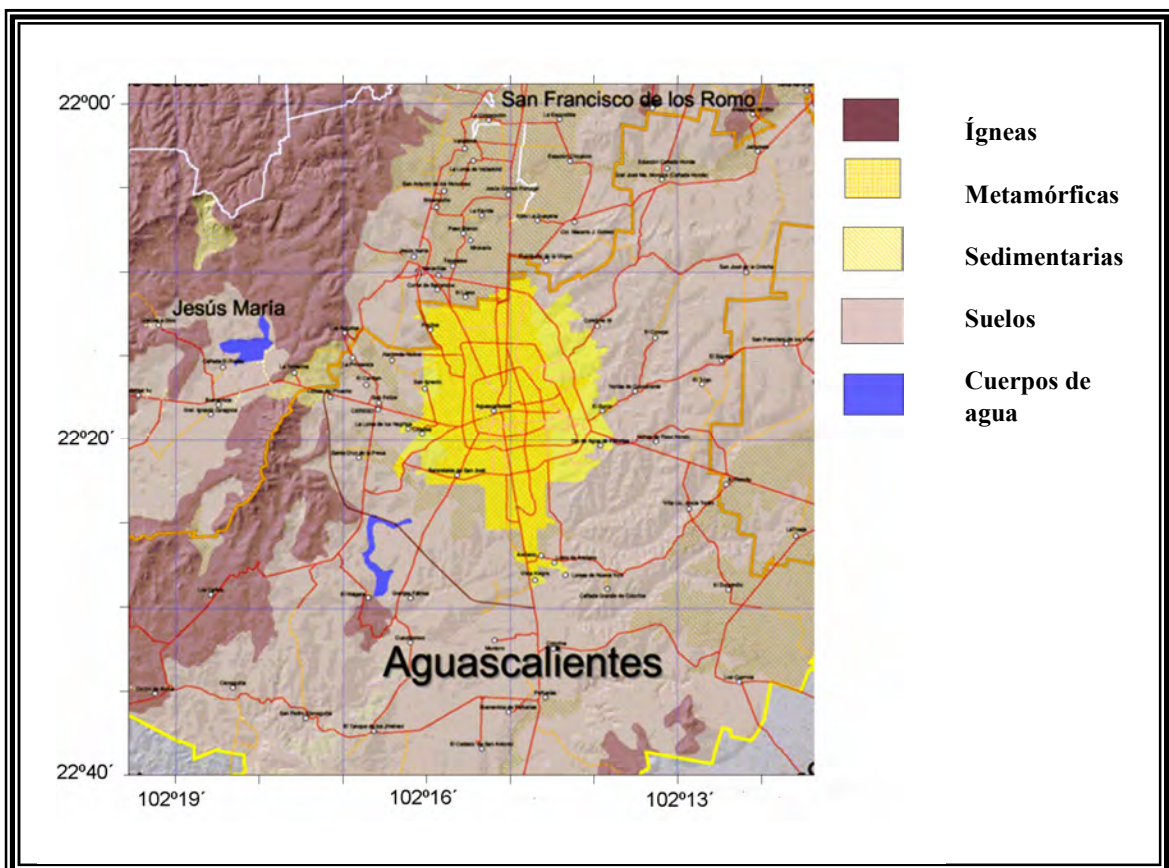


Figura 2.3. Litología de la ciudad de Aguascalientes y áreas conurbadas (SIDIFAG, 2005)

### **II.4.2- Estratigrafía**

La cartografía geológica superficial realizada en algunos estudios (Arroyo, 2005 y Mitre, 2003) señala que en el área que entorna la Ciudad de Aguascalientes constituye diversas unidades litológicas que pueden agruparse en dos conjuntos estratigráficos claramente definidos: uno inferior, plegado y con un ligero metamorfismo regional de bajo grado (esquistos verdes), que constituye el basamento de la región; otro superior, sin más deformación que un importante fallamiento vertical, que representa la cubierta (Arroyo, 2003).

El basamento está representado, en sucesión estratigráfica por el Complejo Filoniano La Tomatina, la serie Volcanosedimentaria Cienaguitas y la secuencia Pelítico-Calcárea Atarjea, el complejo filoniano está constituido por facies plutónicas tonalíticas y dioríticas, atravesada por numerosos filones o diques de diabasa y es correlacionable con el Complejo Filoniano Santana de probable edad jurásica que aflora al NW de la ciudad. La serie volcanosedimentaria está constituida por una sucesión de derrames basálticos almohadillados, sedimentos lutítico-arenosos silicificados y pedernal. Estas lutitas no presentan fauna, por lo que su edad es imprecisa. La litología y el acusado metamorfismo regional (esquistos verdes) de las unidades basales permiten asociarlas a un arco volcánico.

La cubierta cenozoica por su parte está representada por una secuencia riolítica, coronada por una formación volcanoclástica y/o por derrames basálticos cuaternarios. Aflora más completa al oeste del graben, en donde fue considerada primero del Oligoceno, y luego fechada como Eoceno temprano (Martínez, 2004) y en dirección al este sólo afloran las facies volcanoclásticas del Pleistoceno. Las rocas terciarias son típicas de las secuencias de la Sierra Madre Occidental, mientras que las cuaternarias lo son de las fosas y cuencas del centro del país. El graben de Aguascalientes muestra un flanco occidental topográficamente más alto en relación a su flanco oriental. Aparece así como una estructura asimétrica,

formada por tres fallas: una oriental, una central y una occidental. El flanco occidental es un flanco escalonado y el graben propiamente dicho está formado por la falla oriental y la falla central; esta última, que no aflora, está evidenciada por el curso del río San Pedro que corre a la mitad del valle y estudios geofísicos realizados por Arroyo (2003) confirman esta interpretación estructural. El fallamiento Norte-Sur que dio origen al graben y valle de Aguascalientes, refleja únicamente la actividad tectónica más reciente y enmascara estructuras anteriores igualmente importantes que tanto a nivel local como regional se manifiestan por un fallamiento de orientación NE-SW. Éstas a su vez interceptan fallas de orientación ESE-WNW. Se trata evidentemente de las fases tectónicas distensivas terciarias y cuaternarias; estas últimas aún activas, como lo prueba la débil pero verificable actividad sísmica en la región (Lermo, 1996). Por lo que se refiere a las rocas basales, éstas muestran, además de los esfuerzos distensivos terciarios, una deformación compresiva importante que produjo pliegues recostados hacia el NE, acompañados de cizallamientos subhorizontales que a veces se presentan en forma como cabalgaduras importantes.

En la cubierta volcánica afloran rocas de composición félsica de edad inferida del Oligoceno, que fueron afectadas por dos sistemas de fallas, una con rumbo N40°E y la otra con N80°W. Se cree que el sistema de fallas con rumbo N40°E constituye la gran falla del Graben de Aguascalientes. Estas unidades afloran ampliamente en la porción occidental del Valle de Aguascalientes (Sierra Fría, Cerro El Cabrito, La Tomatina), en donde por su expresión geomorfológica es de mesetas sumamente inclinadas (Gómez-Aranda, 1989). Al oriente del Valle, existe un pequeño afloramiento, de lavas de tipo riolíticas de color rosado a café crema, porfiríticas con fenocristales de sanidido, cuarzo y biotita en una matriz que varía de parcial a totalmente desvitrificada con una muy notoria su foliación de derrame. Las tobas son de color claro con textura piroclástica con cuarzo y plagioclasa, fenocristales y líticos redondeados de tamaño variable, presentan un grado de compactación variable. Las ignimbritas son muy semejantes a los derrames laváticos por ser de color rosado a café claro de textura porfirítica y fenocristales de

sanidío y cuarzo y fragmentos de pómez colapsada. De acuerdo con las evidencias superficiales y del subsuelo (Martínez, 2002), existen depósitos clásticos de origen continental, que sobreyacen discordantemente a la cubierta volcánica, al igual que a una unidad proclástica denominada Toba Soyatal. El material que se denomina informalmente Terciario Granular Indiferenciado (Mitre, 2003) aflora en los alrededores de la presa Abelardo L. Rodríguez, mientras que la Toba Soyatal se observa en los canales de los arroyos al oriente de la Ciudad de Aguascalientes. La presencia simultánea (en tiempo y espacio) de estas unidades ocasiona que sus relaciones horizontales y verticales sean variables, de tal modo que es posible encontrarlas interdigitadas. La geometría de estas unidades es muy irregular y está controlada por la estructura de la fosa tectónica.

La edad de La Toba Soyatal determinada con base en fauna fósil corresponde al Mioceno, por lo que se estima que el inicio de la formación del graben corresponde al Oligoceno Tardío-Mioceno Temprano. Durante el Plio-Pleistoceno existieron condiciones que favorecieron la sedimentación de material limo-arcilloso en las porciones topográficamente bajas de la fosa tectónica, muy posiblemente en un medio lacustre. Durante el Pleistoceno tardío ocurre la depositación de una unidad tobácea denominada Toba Aguascalientes y de una secuencia de sedimentos lacustre en el bloque oriental del graben y en el interior del mismo. Esta unidad consiste fundamentalmente de una sucesión de areniscas y de tobas lacustre semiconsolidadas que pueden alcanzar hasta 300 metros de espesor (Arroyo, 2004), aparecen también algunos niveles de sedimentos lacustre recientes de arenas y gravas sin consolidar de algunas decenas de metros. Esta formación presenta afloramientos en la porción oriental del Valle, conformado por lomeríos de la zona Ojo Caliente. En esta región existe material aluvial del Cuaternario que sobreyace discordantemente a la Toba Aguascalientes. Este material es la unidad de mayor extensión en la porción de la fosa que ocupa el Valle de Aguascalientes.

### **II.4.3.- Geología Estructural.**

El Valle de Aguascalientes es de origen tectónico y forma parte de un amplio sistema de extensión. La principal estructura del subsuelo consiste en una fosa tectónica, en donde a lo largo de fallas normales de alto ángulo, varios bloques experimentaron descensos relativos que aumentan hacia la zona central (Montellano, 1980). En este tipo de estructuras, los desplazamientos ocurren generalmente a lo largo de una serie de segmentos de fallas interconectadas, en donde el bloque que experimentó el mayor descenso relativo ocupa sólo una pequeña porción del valle actual. En las porciones inferiores y laterales de la fosa tectónica, los sedimentos clásticos ahí acumulados, son de granulometría gruesa (gravas y arenas), ya que se depositaron durante el tiempo de mayor desplazamiento activo. Una vez que cesó la mayor parte del proceso de hundimiento de la fosa, se depositaron sedimentos más finos, con una facies arcillosa (zona de playa) en las partes topográficamente bajas.

A consecuencia de los eventos geológicos que se sucedieron en el área del Aguascalientes, se aprecian las siguientes estructuras: el oeste de la entidad está cubierto por mesetas de lava, con altitudes entre 2,000 y 3,000 msnm, disectadas por profundas cañadas de paredes escarpadas y con intenso fracturamiento, de orientación preferencial norte-sur y, en menor proporción, en dirección este-oeste y noreste-suroeste. Las fallas que presentan son de tipo normal, con sentido norte-sur y noreste-suroeste; al sur de las mesetas de lava, existen sierras abruptas de tipo volcánico, como las sierras de El Muerto y El Laurel, que presentan orientación noreste-suroeste y tienen altitudes máximas de 2,440 y 2,770 msnm respectivamente. En el noreste de la entidad, la sierra de Tepezalá tiene una orientación norte-sur y una morfología abrupta, que evidencia el origen de su formación y composición de rocas sedimentarias plegadas, metamórficas e ígneas, extrusivas e intrusivas. Además, presenta fallas de tipo normal e inverso y fracturamiento con orientación noreste-suroeste y noroeste-sureste, teniendo una altitud máxima de 2,660 msnm.



Condicionadas ampliamente por la dirección de las estructuras geológicas, el fracturamiento y la pendiente de las montañas hacia los valles, las corrientes del estado ponen de manifiesto el control estructural de la red hidrográfica. Tal es el caso de los ríos Aguascalientes y Calvillo, cuyo curso es en sentido norte-sur y las corrientes tributarias con orientación generalizada de este-oeste. El patrón de drenaje de la región es dendrítico, a excepción de la sierra de Tepezalá, donde es radial centrífugo y del Valle de Aguascalientes, en el que es dendrítico pinado. La densidad del drenaje es moderada, encontrándose bien integrada hacia la vertiente del Pacífico. La dirección del flujo subterráneo, también se encuentra controlada por las estructuras y, en general, sigue la misma dirección que las aguas superficiales.

Por lo que se refiere a las rocas basales, además de ser afectadas por la actividad tectónica distensiva terciaria, previamente lo fueron por una deformación compresiva importante que produce estructuras recostadas hacia el NE. Esta deformación debe relacionarse con movimientos tectónicos de edad laramídica, de finales del Cretácico y principios del Paleógeno (Arroyo, 2003).

## **CAPÍTULO III**

### **FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN CON GPR**

El Radar de Penetración Terrestre (GPR, por sus siglas en inglés), usa ondas electromagnéticas para detectar y localizar objetos en el subsuelo, estructuras y rasgos. El sistema del radar consiste en la generación de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. Una antena situada sobre el terreno emite estas ondas en forma de pulso sucesivos pulsos que se propagan, se reflejan y/o se difractan en las superficies donde se presenta un cambio en la permitividad dieléctrica. La propagación de estos pulsos electromagnéticos por un medio se puede definir teóricamente a partir de las ecuaciones de Maxwell para ondas electromagnéticas; sus fundamentos teóricos son los mismos que los de un radar convencional para detectar un objeto, pero el GPR utiliza un ancho de banda más amplio, y las antenas receptora y emisora se dirigen hacia el medio a estudiar (subsuelo, estructura u objeto).

#### **III.1 PROPIEDADES ELECTROMAGNÉTICAS DE LAS ROCAS**

La propagación de ondas electromagnéticas en un medio o roca, está influenciada por las propiedades eléctricas de los materiales a través de los cuales fluye la corriente. La propiedad electromagnética de los materiales afecta a la velocidad y propagación de la onda. La aplicación de los métodos electromagnéticos requiere del conocimiento de los principios básicos y las propiedades electromagnéticas de las rocas.

##### **III.2.1 Conductividad y resistividad eléctrica**

La resistividad eléctrica  $\rho$  y la conductividad eléctrica  $\sigma$  son propiedades físicas de los materiales que describen la movilidad de la carga eléctrica y la presencia del campo eléctrico. La resistividad de una roca se define como la capacidad que tiene para oponerse al flujo de la corriente eléctrica; y se determina numéricamente

por la resistencia que se obtiene por volumen de una sustancia. En un material conductivo la carga eléctrica se mueve libremente; en un material resistivo la carga eléctrica no es inminente. Un ejemplo de un buen conductor es el cobre, mientras que un buen material resistivo sería el caucho, que es usado como aislante. De acuerdo con la ley de Ohm la resistencia R esta dada por  $R=V/I$  (Ohm/m), donde V es la diferencia de potencial e I es la corriente aplicada.

La propiedad física de resistividad puede ser determinara por:

$$\rho = \frac{LA}{I} (\Omega m) \quad (3.1)$$

Donde A es la sección de área y L la longitud del resistor y la conductividad eléctrica es el inverso de la resistividad, de modo que se tiene:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} (\Omega^{-1} m^{-1}) \quad (3.2)$$

Sus dimensiones se dan en siems sobre metro o siems por centímetro (Sm/m, Sm/cm). A una roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de un esqueleto sólido mineral, de líquidos y gases. Por lo tanto la resistividad de tal agregado influyen los siguientes factores:

- 1) La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca
- 2) La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- 3) La humedad de la roca
- 4) La porosidad de la roca.
- 5) La textura de la roca y la forma de distribución de sus poros.
- 6) Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto mineral.
- 7) Variación de la resistividad con la temperatura y presión.

Usualmente las mediciones electromagnéticas están dadas en términos de la conductividad, porque los cuerpos de los materiales son más sensibles a ésta. (Tabla 3.1), los materiales geológicos con altas conductividades incluyen arcillas, limos, aguas contaminadas, agua salada, etc. Los metales y dióxidos de azufre son conductores eléctricos; algunas rocas con baja conductividad son la limonita, dolomía, evaporita, y rocas ricas en cuarzo.

**Tabla 3.1. Valores aproximados de algunos materiales más comunes para una frecuencia de 100 MHz (Milsom, 2003)**

MATERIAL	CONSTANTE DIELECTRICA ( $\epsilon$ )	CONDUCTIVIDAD ELECTRICA ( $\sigma$ Ms/m)	PERMITIVIDAD	VEL. RADAR V (M/ns)
Aire	1	0	1	0.30
Agua dulce	80	0.5	50	0.033
Agua salada	80	3000	81-88	0.01
Arena mojada	20-30	0.1-1	20-30	0.06
Arena seca	3-5	0.01		0.15
Arcilla	5-40	2-1000	5-40	0.06-0.17
Caliza	4-8	0.5-2	4-8	0.12
Concreto		0.01-10	6	0.09
Lutitas	5-15	1-100	5-15	0.09
Granito	4-6	0.01-1	4-6	0.13
Hielo	3-4	0.01	3-4	0.16

La diferencia de conductividad entre los granos del mineral es muy pequeña, la conductividad eléctrica depende de la presencia de fluido y sales en los poros de la roca. La corriente eléctrica fluye prácticamente por el electrolito que rellena los poros; por esta razón la conductividad eléctrica de las rocas es esencialmente electrolítica (iónica). Los minerales de la familia de las arcilla son iónicamente activos y buenos conductores, de aquí se deduce que la humedad de las rocas influye en la resistividad, y la conductividad se incrementa con respecto a la

porosidad. La relación fundamental de la conductividad en rocas fue definida por Archie (1942):

$$F = \frac{\rho}{\phi} = \frac{\infty}{\emptyset} \quad (3.3)$$

Donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica de la formación de la roca,  $\phi$  es la resistividad del agua,  $\Phi$  es la porosidad del agua  $F$  es el factor de formación y  $\alpha$  es una constante de saturación y cementación. Esta ecuación es aplicable en formaciones limpias de arenas, cuando hay presencia de minerales de arcilla, el modelo de Waxman-Smits (1968) es aplicable. En este modelo se considera que la conducción catiónica y la conducción del electrolito de cloruro de sodio actúan de forma independiente en el espacio poroso, dando trayectorias de conducción paralelas.

### **III.1.2 Polarizabilidad.**

Si un trozo de roca o mineral se encuentran en un campo eléctrico, entonces bajo la influencia de este campo, se produce una redistribución de las partículas cargadas, las rocas y minerales se polarizan. Si es un material conductor hay una gran cantidad cargas libres que se mueven al ser expuesto con el campo, en los dieléctricos las cargas positivas y negativas sufren un desplazamiento al ser aplicado el campo. Al ocurrir el desplazamiento de cargas debido al campo eléctrico, se dice que la materia se ha polarizado. Cuando el campo eléctrico es removido las partículas regresan a su lugar original, al igual que un resorte, también cumplen con a la ley de Hooke, el sistema regresa a su estado original, durante el desplazamiento se lleva a cabo un almacenamiento de energía. En la práctica para el desarrollo teórico se considera a la polarización como un proceso único, cuya intensidad se caracteriza por la intensidad del campo que se crea por las zonas polarizadas del medio.

La polarización de las rocas y minerales está relacionada con procesos que surgen en la superficie de separación de la fase líquida y sólida, dentro de la roca, por ello es muy difícil detallar todo el proceso de polarización de las rocas. La polarizabilidad de las rocas y minerales disminuye con el aumento de la humedad y mineralización del agua de los poros (Keller, 1989).

### **III.1.3. Constante dieléctrica**

La intensidad del campo eléctrico está dada por la propiedad de las sustancias dieléctricas que es la **constante dieléctrica (o permitividad relativa  $\epsilon_r$ )**. Se denomina permitividad relativa de cualquier sustancia  $\epsilon_r$ , a un coeficiente igual a la relación entre la intensidad del campo eléctrico en este material y la intensidad del campo en el vacío; que determina el grado que se modifica el campo eléctrico, permitividad relativa esta dada por:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (3.4)$$

Donde la permitividad del vacío ( $\epsilon_0$ ) es de  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m.

La permitividad dieléctrica relativa varía entre 1 unidad (aire) y 80 (agua de mar), para sedimentos secos tiene una constante dieléctrica de 4 a 10 (Tabla 3.1); la permitividad eléctrica se incrementa con el contenido de agua y de la polarización individual. El contenido de agua influye en la propagación de ondas de radar (Burger, 2006).

### **III.1.4 Constante dieléctrica para rocas y minerales**

La constante dieléctrica varía dependiendo la polarización, la densidad y el contenido del agua que contenga la estructura cristalográfica, de las impurezas y su contenido de agua (Orellana, 1972). Algunos ejemplos se encuentran en la

Tabla 3.2. La constante dieléctrica, en la mayoría de los minerales constituyentes de las rocas, entre los cuales están todo el grupo de los silicatos oscila de 3 a 10 unidades y raramente alcanza 25. La constante dieléctrica del agua es del orden de 81; de aquí se deduce que la constante dieléctrica de las rocas depende fuertemente de la humedad, aunque propiamente la constante dieléctrica de las rocas depende de sus componentes, incluidos sus minerales, su porosidad, su saturación y tipo de líquido en sus poros.

**Tabla 3.2. Constante dieléctrica de algunos minerales (Conyers, 2004)**

<b>Mineral</b>	<b>Constante Dieléctrica</b>	<b>Mineral</b>	<b>Constante Dieléctrica</b>
Cuarzo	4.1-4.3	Anortita	7
Ortoclasa	4.4-5.8	Calcita	7.5-8.5
Halita	5.7-6.2	Apatita	7.4-10
Muscovita	6.2-8	Cordón	11-13
Biotita	6.2-9.3	Galena	18
Labradorita	6.5	Hematina	25

### **III.1.5 Permeabilidad magnética**

La permeabilidad magnética es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la intensidad de campo magnético existente y la inducción magnética que aparece en el interior de dicho material. En la tabla 3.3, se muestra la permeabilidad magnética de algunas rocas y minerales.

La magnitud se denomina permeabilidad absoluta y suele representar por el símbolo  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ (N/A}^2\text{)} \tag{3.5}$$

Donde  $B$  es la *inducción magnética* en el material, y  $H$  es intensidad de campo magnético. La permeabilidad del vacío, conocida también como *constante magnética*, se representa mediante el símbolo  $\mu_0$  y se define como:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m.

Donde H es un *Henry* en el SI.

**Tabla 3.3. Permeabilidad magnética de algunos minerales (Keller, 1978)**

<b>Mineral</b>	<b>Permeabilidad del vacío (<math>\mu_0</math>)</b>
Cuarzo (diamagnético)	0.999985
Calcita (diamagnético)	0.999987
Rutilio (paramagnético)	1.0000035
Pirita	1.0015
Hematina	1.053
Ilmenita	1.55
Pirrotita	2.55
Magnetita (ferromagnético)	5.0

### **III.1.6 Susceptibilidad magnética**

La susceptibilidad magnética ( $\chi_m$ ): de una sustancia es la relación que existe entre la intensidad magnética que posee dicha sustancia y el campo magnético o fuerza magnética terrestre, es decir si se hace actuar un campo magnético inducido  $H$  sobre un cuerpo cualquiera, éste se magnetizara débilmente.

El cuerpo adquiere un momento  $m$  y el volumen de la materia  $V$ , entonces el momento magnético quedará:



$$M = \frac{m}{V} \text{ (A/m)} \quad (3.6)$$

La magnitud  $M$  recibe el nombre de magnetización y es proporcional al campo  $H$ , entonces se puede escribir como:

$$M = \chi H \quad (3.7)$$

Donde  $\chi$  es la susceptibilidad magnética y depende de la naturaleza del cuerpo; en general  $\chi$  es una constante para cada cuerpo ferromagnéticos en función de  $H$ , la susceptibilidad magnética es adimensional. Los materiales pueden clasificarse en diamagnéticos ( $\chi < 0$ ), paramagnéticos ( $\chi > 0$ ) y ferromagnéticos ( $\chi > 0$  y más grande).

## **III.2 PRINCIPIOS BÁSICOS DEL GPR**

### **III.2.1 Ondas eletromagnéticas**

Una onda electromagnética se define como la variación en el espacio y tiempo del vector campo eléctrico  $E$  y campo magnético  $H$ , estas variaciones son siempre ortogonales entre sí y a la dirección de propagación. Las cargas eléctricas al ser aceleradas originan ondas electromagnéticas; el campo  $E$  originado por la carga acelerada depende de la distancia de la carga, la aceleración de la carga y del seno del ángulo que forma la dirección de aceleración de la carga y la dirección al punto en que medimos el campo ( $\sin\Theta$ ) (Figura 3.1). Un campo eléctrico variable engendra un campo magnético variable y este a su vez uno eléctrico, de esta forma las ondas electromagnéticas se propagan en el vacío (Jeffrey, 2000).

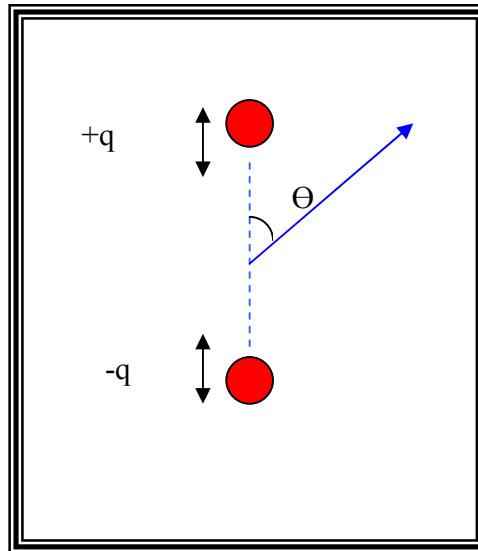


Figura 3.1 Modelo de formación de ondas electromagnéticas al dipolo eléctrico oscilante

Las ondas electromagnéticas incluyen microondas, radar, radio, rayos gamma, rayos X y otras, todas aquellas que envuelven la propagación de los campos electromagnéticos, a través del espacio con una velocidad  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Las ondas electromagnéticas se producen por la aceleración de los electrones y otras partículas cargadas. La diferencia entre varios tipos de ondas electromagnéticas es la relación de frecuencia y longitud de onda (Figura 3.2), llamado el espectro electromagnético.

Los nombres asociados con los rangos de longitud de onda o frecuencia, por ejemplo para las ondas electromagnéticas usadas en el GPR, el rango es aproximadamente de 10 MHz a 1 GHz. Unas completas descripciones de las ondas electromagnéticas se basa en las leyes del magnetismo y la electricidad, expresadas en las ecuaciones de Maxwell; un grupo de ecuaciones diferenciales parciales, lineales en espacio y tiempo, aplicadas a cantidades electromagnéticas.

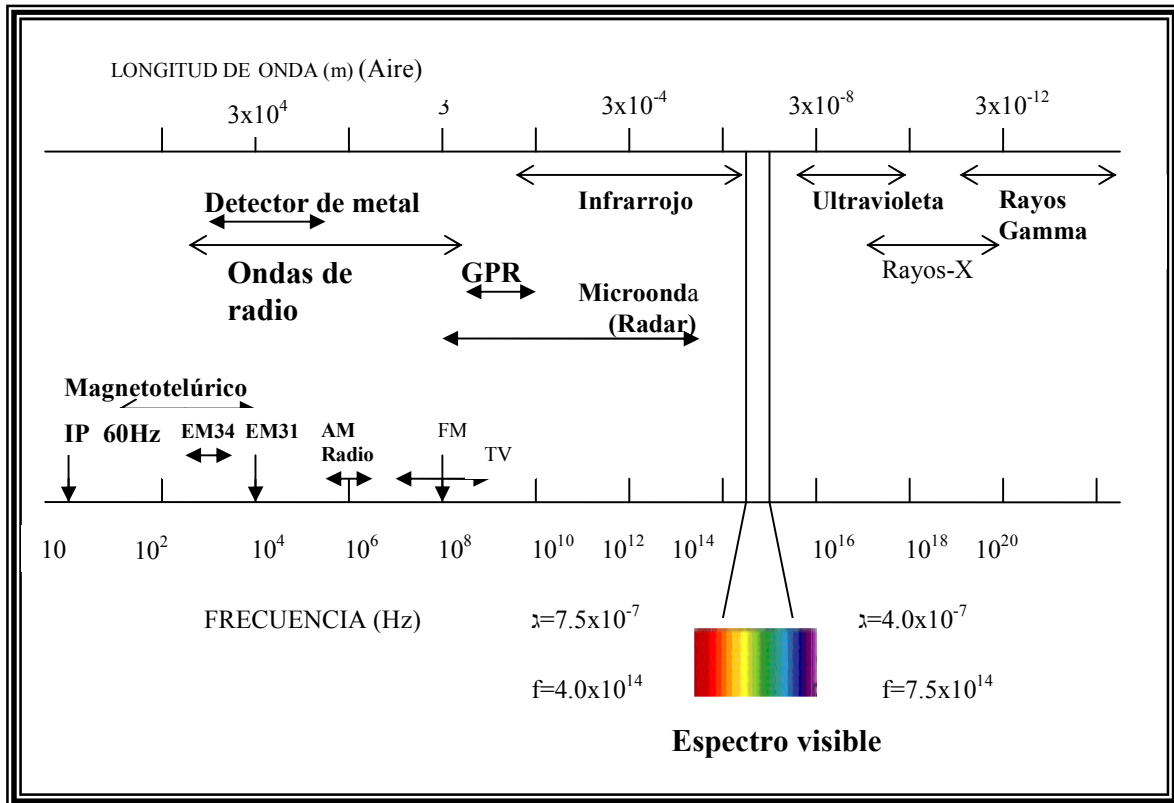


Figura 3.2. Espectro electromagnético de interés para la geofísica (tomado de Burger, 2006)

Las cantidades electromagnéticas involucradas en las ecuaciones de Maxwell son las cuatro ecuaciones de Maxwell que son las siguientes:

Ley de Gauss, para el Campo eléctrico

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.8)$$

de manera similar la ley para el Campo magnético

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.9)$$

La ley de Faraday

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.10)$$

Ley de Ampere

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.11)$$

Donde:

E – intensidad de campo eléctrico, sus unidades son Wb·m<sup>2</sup>.

H – intensidad de campo magnético, sus unidades son A/m o N·Wb.

B – inducción magnética o densidad de flujo magnético (N Wb)

D - inducción eléctrica o densidad de flujo eléctrico, sus unidades son c/m<sup>3</sup>.

J – densidad de corriente (superficie).

ρ - densidad de carga (volumen).

La primera ecuación de Maxwell nos dice que la divergencia del campo eléctrico, E, sobre una superficie cerrada es proporcional a la densidad de carga, contenida dentro de la superficie; en otras palabras, el flujo de E a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga neta contenida dentro de la superficie. La segunda ecuación expresa que el campo magnético, B, tiene una divergencia igual a cero; esto es, no hay monopolos magnéticos; el flujo de B a través de cualquier superficie cerrada es siempre cero, y las líneas del flujo magnético son líneas cerradas. La tercera ecuación de Maxwell es conocida como la ley de Faraday, determina cómo la variación en el tiempo de un campo magnético, induce a un campo eléctrico. En otras palabras, si en cierta región del espacio un campo magnético cambia con el tiempo éste inducirá un campo eléctrico de la forma:

$$-\nabla \times E$$

Finalmente la cuarta ecuación de Maxwell, conocida como la ecuación de Ampere más el término de inducción añadido por Maxwell. Esta ecuación que es posible inducir un campo magnético por medio de una corriente eléctrica,  $J$ , o por un campo eléctrico que varía con el tiempo; este último término fue añadido por Maxwell para completar sus ecuaciones; (Magdy [1992], Kraus [1992] y Cheng [1997]).

### **III.1.2 Ecuación de onda**

El estudio y desarrollo de la ecuación de onda es de gran importancia, principalmente, a que es una de las herramientas que permitirá entender como es el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Una de las consecuencias más importantes de las ecuaciones de Maxwell es la deducción de las ecuaciones de propagación de las ondas electromagnéticas en diferentes medios, suponiendo un dieléctrico perfecto donde las distribuciones de carga eléctrica  $\rho_v$ , y corriente eléctrica,  $J$  son cero. Las ecuaciones de Maxwell, se pueden expresar ahora como:

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.13)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.14)$$

$$\nabla \times \frac{B}{\mu_0} = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.15)$$

Donde:  $\epsilon_0 = 10^9 / 36\pi$  fad/m y  $\mu_0 = 4\pi \times 10^9$  Henrios/m son la permitividad y la permeabilidad eléctricas en el vacío respectivamente.

Ahora solo tenemos ecuaciones diferenciales de primer orden con dos variables, combinando las ecuaciones de tal manera que eliminen los campos (**B** o **E**), para dar una ecuación diferencial conocida como *ecuación de onda* (Kraus, 1992).

Después de realizar todo el trabajo matemático, se obtiene la siguiente expresión para el Campo eléctrico, para un medio lineal, homogéneo e isótropo, en ausencia de fuente (Johnk [1992], Kraus [1994]). La ecuación de onda queda:

$$\nabla^2 \bar{E} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{E}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.16)$$

De la misma manera, se obtiene una ecuación para el campo magnético:

$$\nabla^2 \bar{B} - \mu\sigma \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \bar{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.17)$$

Resolviendo la ecuación de onda para el campo eléctrico tenemos (Kraus, 1984):

$$\bar{E} = E_0 e^{-i\gamma Z} \bar{i} \quad (3.18)$$

Donde:

Z = impedancia

$\gamma^2$  = constante de propagación

i=número complejo

A partir de aquí se puede expresar el vector de propagación como:

$$\gamma = \alpha + i\beta$$

donde  $\alpha$  es la constante de atenuación, ( $m^{-1}$ ), la cual es la responsable de ir retrasando a la onda electromagnética cuando esta se desplaza en el medio y  $\beta$  constante de fase, (rad/m).

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2}} \sqrt{(\omega^2 \epsilon^2 + \sigma^2)^{\frac{1}{2}} + \omega\epsilon} \quad (3.19)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2}} \sqrt{(\omega^2 \epsilon^2 + \sigma^2)^{\frac{1}{2}} - \omega\epsilon} \quad (3.20)$$

Para el método Radar de Penetración Terrestre (GPR), la constante de atenuación y de fase, está dada por:

$$\alpha \approx \omega \sqrt{\mu\epsilon}$$

$$\beta \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

Para la impedancia del medio ( $\eta$ ), que es la resistencia para corrientes en función del tiempo la expresión más generaliza para cualquier medio es:

$$\eta = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon}} \quad (3.21)$$

### **III.1.3 Coeficientes de reflexión y transmisión**

El resultado práctico de la radiación de las ondas electromagnéticas dentro del subsuelo, es medido por el GPR y su principio de operación básico se encuentra en la figura 3.3. La radiación de las ondas electromagnéticas se transmiten por una antena transmisora, y éstas viajan por los materiales con una velocidad que está en función de las propiedades eléctricas del material. A medida que la onda se propaga y viaja por el subsuelo, si interactúa con un medio con propiedades eléctricas diferentes, parte de la energía de la onda es reflejada o dispersada de vuelta a la superficie, mientras que parte de la energía continúa viajando hacia

abajo. La onda que es reflejada de vuelta a la superficie es capturada por una antena receptora y grabada por un dispositivo de almacenamiento digital.

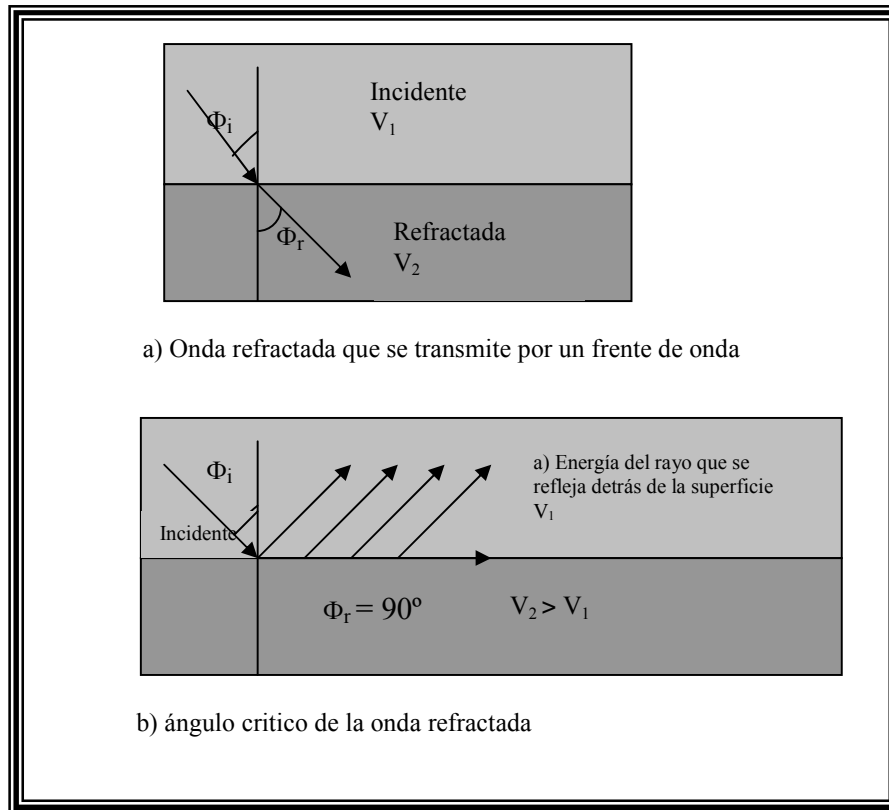


Figura 3.3. La radiación de las ondas electromagnéticas, viajan por los materiales con una velocidad la cual es determinada principalmente por la permitividad del material

Este fenómeno de reflexión y transmisión dependen de las propiedades electromagnéticas del medio y del ángulo de incidencia, la energía transmitida puede reflejarse por otra interfase debajo y así sucesivamente. La impedancia  $Z$  (Ohm) presentada por cualquier medio está dada por:

$$Z = \frac{\omega\mu}{\gamma} \tag{3.22}$$

Donde  $\gamma = (\sigma(\omega^2\epsilon\mu + i\omega\mu))^{\frac{1}{2}} = \alpha + i\beta$

$Z$  es una cantidad compleja debido a que  $k$  es compleja.



El coeficiente de reflexión está dado por

$$R = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (3.23)$$

Donde  $V_1$  y  $v_2$  son las velocidades de las ondas electromagnéticas para las capas 1 y 2 respectivamente y  $V_1 < V_2$ .

Si los dos medios son no conductores y ponemos  $\epsilon_1 = \epsilon_{1r} \epsilon_0$  y  $\epsilon_2 = \epsilon_{2r} \epsilon_0$ , donde  $\epsilon_{1r}$  y  $\epsilon_{2r}$  son permitividades relativas, el coeficiente de reflexión puede expresarse como:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{1r}} - \sqrt{\epsilon_{2r}}}{\sqrt{\epsilon_{1r}} + \sqrt{\epsilon_{2r}}} \quad (3.24)$$

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a dos medios en ambos lados de la interface y la onda se supone incidente del medio 1. Estas dos expresiones satisfacen las condiciones de continuidad de la componente tangencial del campo eléctrico a través de la interface, esto es,  $E_i + E_r = E_t$ , ó  $1 + R = T$ . La incidencia normal implica que la misma antena es usada para transmitir y recibir la señal. Sin embargo, si la distancia entre antenas es pequeña comparado con la distancia a la interface, la incidencia puede ser asumida como normal y las ecuaciones son adecuadas.

#### **III.1.4 Profundidad de penetración (*Skin depth*)**

Las ondas de radar se atenúan al propagarse a través del terreno. La profundidad de investigación que puede obtenerse a partir de una exploración por GPR es función de diferentes parámetros, como la frecuencia del impulso emitido por la antena y de las propiedades eléctricas del terreno, como, permitividad,

conductividad, que a su vez depende del contenido en arcilla, de la humedad del suelo y la salinidad del agua contenida del medio y de la frecuencia de las ondas.

La onda que viaja en un medio con parte conductora penetra sólo una determinada distancia, el espacio que recorre la onda dentro del medio, se llama profundidad de penetración o *skin depth*, se representa por la letra ( $\delta$ ) y se mide en metros, el valor de la profundidad de penetración se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \tag{3.25}$$

Escribiendo la profundidad de penetración en términos de la permeabilidad y la permitividad relativa tenemos:

$$\delta = \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0 \mu_r}} \cong \frac{2}{\sigma} \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\mu_0}} \tag{3.26}$$

### **III.1.5 Velocidad de propagación y atenuación**

Las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad específica que es determinada principalmente por la permitividad del material. La relación entre la velocidad de la onda y las propiedades eléctricas del material, son fundamentos básicos que usa el GPR en la investigación del interior de la tierra. Las propiedades de los materiales están relacionadas por el contenido de agua y su composición, ejerciendo mucho control en la velocidad y atenuación (Figura 3.4) de las ondas electromagnéticas en los materiales.

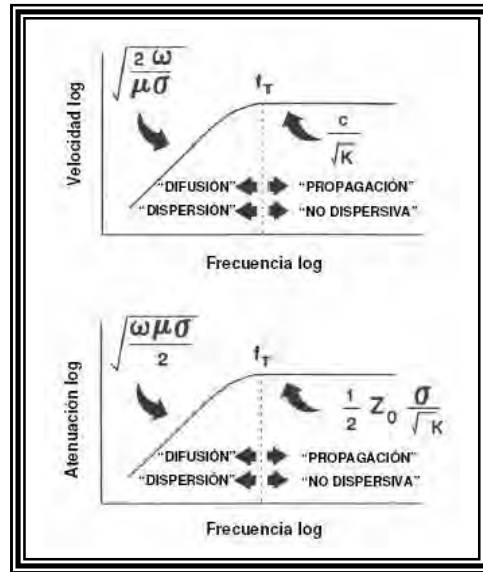


Figura 3.4. Ilustración del comportamiento de la velocidad y la log atenuación en función de la log frecuencia (Annan, 1992)

La velocidad de una señal que pasa a través de dos materiales con diferentes propiedades eléctricas, sobre una misma distancia arribará con diferentes tiempos; para 1 ns es igual a  $10^{-9}$  s. La velocidad de una onda electromagnética en el aire es  $3 \times 10^8$  m/s (0.3 m/ns). La frecuencia típica para los equipos son de 10KHz (10,000Hz), usando una velocidad de alrededor de  $3 \times 10^8$  m/s, en el vacío las ondas viajan a la velocidad de la luz (c), en otros materiales la velocidad de las ondas de radar están determinadas por las propiedades electromagnéticas, por la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ), y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ).

La velocidad es proporcional al inverso de la raíz cuadrado de la permitividad del material y el tamaño de la permitividad de los materiales de la tierra siempre son más grandes que la permitividad del aire. El tiempo de viaje de una onda en un material que no sea el aire es siempre mayor que 0.33 m/ns. El cálculo de la *velocidad de propagación* en un medio y la *profundidad* de la formación o del objeto a estudiar se determina mediante las siguientes expresiones donde:

V es la velocidad de propagación de la onda electromagnética en el medio,

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío

$\epsilon$  es constante dieléctrica

$\mu$  la permeabilidad magnética del material a través del cual pasa la onda

En general la permitividad eléctrica se incrementa con el contenido de agua y tiene gran influencia en la propagación de la onda de radar, la señal del radar está dada por:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.27)$$

En esta expresión se pueden observar los factores que resultan del decremento de la intensidad de la señal en la propagación de las ondas electromagnéticas a través del medio de la superficie (Figura 3.3). La pérdida de energía ocurre como consecuencia de la reflexión y transmisión, en la cual la interface se pierde y ocurre en el tiempo que la onda de radio atraviesa el cuerpo. La causa fundamental de la pérdida de energía es la atenuación la cual es una función compleja de las propiedades eléctricas y dieléctricas del medio donde la señal de radar viaja, el factor de atenuación ( $\alpha$ ) depende de la constante dieléctrica ( $\epsilon_r$ ), permeabilidad magnética ( $\mu_r$ ) y conductividad eléctrica ( $\sigma_r$ ) del medio el cual la señal se propaga, así como la frecuencia de la señal. El volumen o tamaño del material se determina por las propiedades físicas que los constituyen y su respectiva proporcionalidad. Como con otras ondas electromagnéticas la señal profundiza al decremento de la amplitud (37%), el valor inicial se conoce como profundidad de penetración o *Skin depth* ( $\delta$ ) y es inversamente proporcional al factor de atenuación (ecuación 3.17), la definición matemática del coeficiente de atenuación está dada por la siguiente ecuación:

$$\alpha = \omega \left\{ \left( \frac{\mu \epsilon}{2} \right) \left[ 1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right]^{1/2} - 1 \right\}^{1/2} \quad (3.28)$$

## CAPÍTULO IV PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MÉTODO DE GPR

### IV.1 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE GPR GSSI-SIR-3000

Para la elaboración de este estudio se empleó el equipo GSSI-SIR-3000, el cual consta de un monitor, sistema de almacenamiento de datos y unidad digital de control (DC-2A) con software, adaptador de potencia (Conector de potencia SIR-3000, también con iluminador), adaptador de potencia (Conector de potencia SIR-3000, con un cable caimán), cable de 30 metros de transmisión, y opcionalmente odómetro y cinta.

Los constituyentes básicos del sistema GPR (GSSI SIR-3000) se presentan en la figura 4.1. Cada unidad está encargada en realizar una serie de tareas, como se describe a continuación.



Figura 4.1 Equipo de Radar de Penetración Terrestre

### **IV.1.1. Antena**

La antena es aquel instrumento encargado de generar pulsos electromagnéticos y recibir los pulsos, ocasionados por su interacción con el subsuelo. Existen dos tipos de arreglos de antenas: las monoestáticas y biestáticas. Las primeras están compuestas por un sólo elemento (antenas de dipolo cruzado) encargado de transmitir, conmutar y recibir, estas principalmente se ocupan en antenas de alta frecuencia (Figura 4.2). Los arreglos de antenas biestáticas la componen dos elementos separados, una antena transmisora que envía los pulsos electromagnéticos y una antena receptora que registra las ondas reflejadas provenientes del subsuelo. Estos arreglos generalmente se utilizan en frecuencias más bajas.



Figura 4.2. Antenas utilizadas durante el trabajo en campo

Normalmente, una antena de GPR emite una sucesión de pulsos de la misma forma y duración a intervalos definidos. La frecuencia en torno a la cual la mayoría de los pulsos de energía se concentra se llama la frecuencia central, la frecuencia central de un sistema del GPR tiene previsto crear una frecuencia de ancho de banda (el ancho de pulso en el dominio de la frecuencia), que es similar a la frecuencia central. El intervalo en el que las señales están incluidos en la muestra se llama intervalo de muestreo (su inverso se le denomina frecuencia de

muestreo,  $f_s$ ). El teorema de muestreo se refiere a los aspectos de muestreo de la señal (Yilmaz, 1987; Dobrin y Savit, 1988). El criterio del teorema de muestreo para un pulso se representa por sus muestras, es que la frecuencia de muestreo debe ser de al menos dos veces mayor que la frecuencia máxima  $f_{\max}$  del pulso.

#### **IV.1.2 Unidad de Control**

El control digital y parte del despliegue de un sistema de GPR generalmente consiste de un convertidor análogo-digital, un microprocesador, memoria y un sistema de almacenamiento de datos digitales. Una pequeña microcomputadora y un sistema operativo, son utilizados como un controlador de medidas, el almacén de datos, y actúa también como interfaz con el operador. Su función principal es de almacenar los datos en un medio magnético y desplegar las mediciones realizadas. Generalmente es un equipo portátil con alimentación de energía por medio de baterías. El almacenamiento de los datos es en tiempo real, por lo que se pueden aplicar filtros y ganancias al despliegue de los datos.

#### **IV.1.3 Sistema de posicionado de los datos**

Para posicionar las observaciones del GPR, se utilizan generalmente dos métodos: odómetros para ubicación lineal relativa al punto de inicio o GPS para tener una ubicación tridimensional.

#### **IV.2 Funcionamiento de un sistema de GPR**

Los equipos GPR son de baja potencia y transmiten energía electromagnética en el subsuelo en un ancho de banda que va de aproximadamente de los 10 MHz a 2000 MHz. La potencia total transmitida es de tan sólo unos miliwatts (mW). El sistema de GPR trabaja esquemáticamente de la siguiente manera (Figura 4.3):

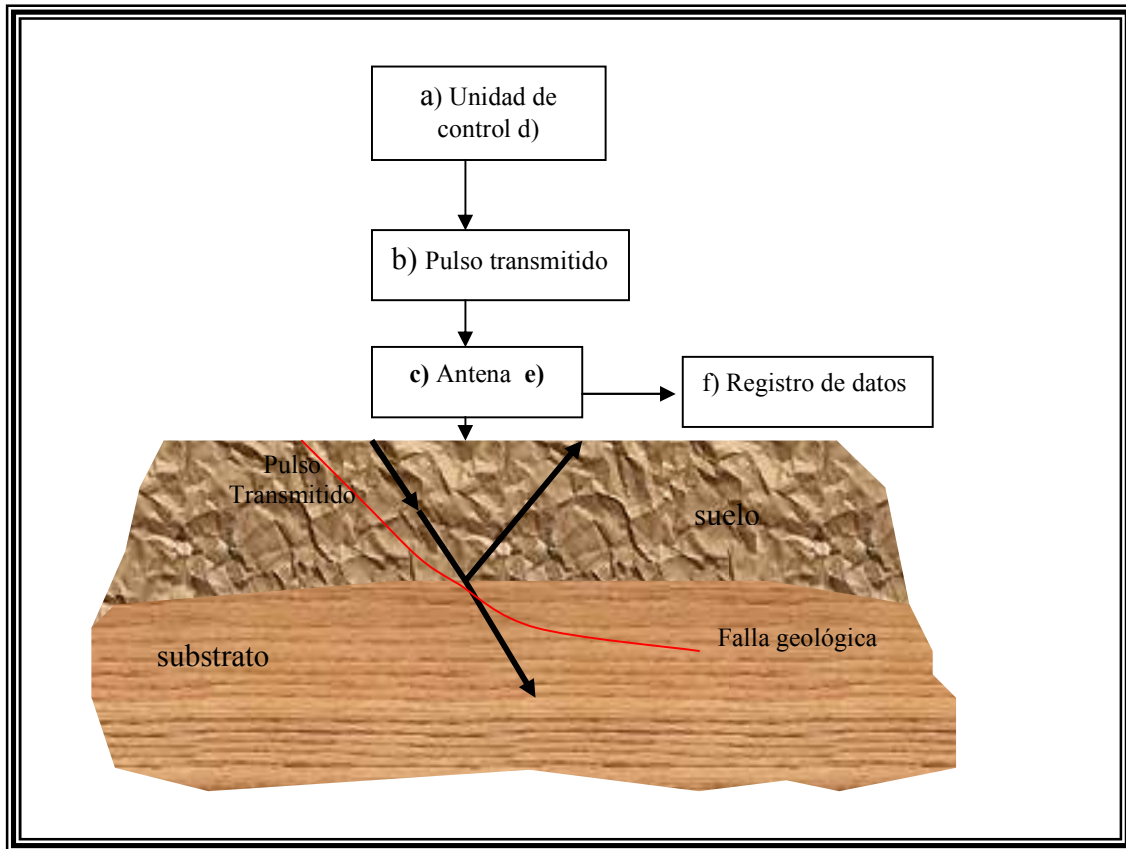


Figura 4.3. Sistema de trabajo del GPR

- a) Se genera un pulso en la unidad de control con una frecuencia de 50KHz a 25KHz y un voltaje de 150 V a 400 V con una duración de 0.5 a 10 nanosegundos, dependiendo de la frecuencia de operación utilizada. El pulso generado es enviado a través de un cable coaxial o de fibra óptica al circuito de la antena (Figura 4.4).
- b) El pulso es radiado de la antena al subsuelo. El diseño de la antena y las propiedades electromagnéticas del subsuelo determinan el ancho del pulso (antenas de grandes dimensiones igual a baja frecuencia, antenas pequeñas dimensiones igual alta frecuencia).



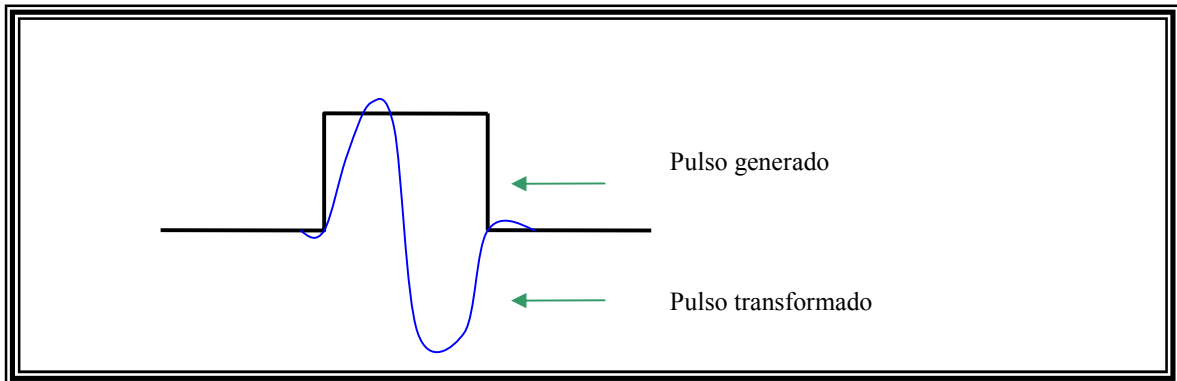


Figura 4.4. Pulso generado en la unidad de control del GPR

- c) En el subsuelo, las reflexiones se presentan cuando existen unos contrastes en las propiedades electromagnéticas de los materiales, por lo que parte de la señal reflejada viaja de regreso a la antena.
- d) El receptor de la antena detecta la señal reflejada, la envía de regreso a la unidad de control y es reconstruida en una tarjeta de conversión análogo-digital a partir de una frecuencia y densidad de muestreo determinada.
- e) En la unidad de control la señal es procesada y enviada al monitor, disco y/o impresora.
- f) las señales así obtenidas pueden usarse para generar una imagen (radargrama) el cual es una representación gráfica del subsuelo en función de tiempo (o distancia). El eje horizontal es la distancia a lo largo de la superficie. El eje vertical representa el tiempo de viaje doble de la señal en nanosegundos (Figura 4.5).

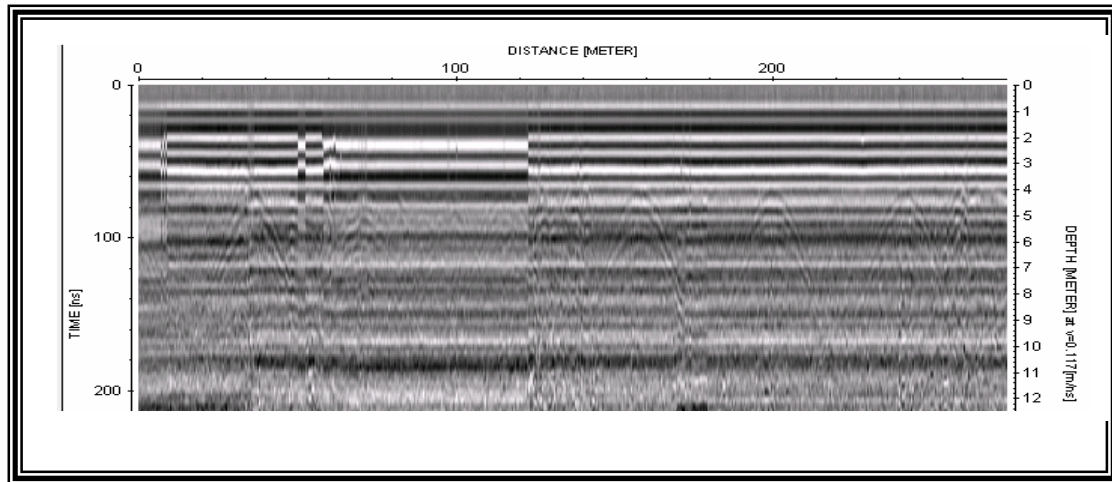


Figura 4.5. Representación gráfica de datos capturados por un GPR (radargrama)

### **IV.3 ESQUEMA DE UN SONDEO DE RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE**

La técnica del GPR está basada en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas en un medio de propagación (material sólido, generalmente no homogéneo). La incidencia de una onda electromagnética sobre el medio de propagación puede provocar fenómenos de reflexión, refracción y difracción, los cuales son susceptibles de ser detectados por la antena receptora. Por lo tanto lo que el sistema de GPR detectará son las variaciones en las propiedades electromagnéticas del medio, junto con las características de las ondas, que son aquellas que rigen la propagación de la energía en un medio. Este método establece una geometría fija de las antenas, y dependiendo del diseño del instrumento es posible trabajar de una forma monoestática o biestática. Las antenas receptoras y transmisoras se mueven independientemente en el modo fijo de operación. Esto permite mayor flexibilidad la operación de campo, la antena transmisora y receptora, estos arreglos se desplazan sobre el terreno tomando lecturas a distancia y tiempos preestablecidos y/o equidistantes para obtener secciones bidimensionales conocidos como radargramas. En el modo fijo de operación, una traza es el registro en la cual la posición discreta de la antena

receptora y transmisora a través de la siguiente secuencia de eventos en el sistema del GPR.

- 1) Se transmite una onda.
- 2) El receptor está encendido para recibir y registrar las señales recibidas.
- 3) Después de un cierto periodo de tiempo el receptor se apaga.

El resultado se llama traza, y son mediciones que se registran durante el periodo de tiempo que el receptor y se registra la llegada de energía. El conjunto de todas las trazas es una representación gráfica del medio (subsuelo) en el cual la abcisa corresponde a la distancia (o tiempo) recorrida y la ordenada al tiempo que tarda la onda en encontrar la superficie reflectante y volver al receptor, es decir “tiempo doble (*two time travel*)”. La figura 4.6 muestra un ejemplo de radargrama de una traza.

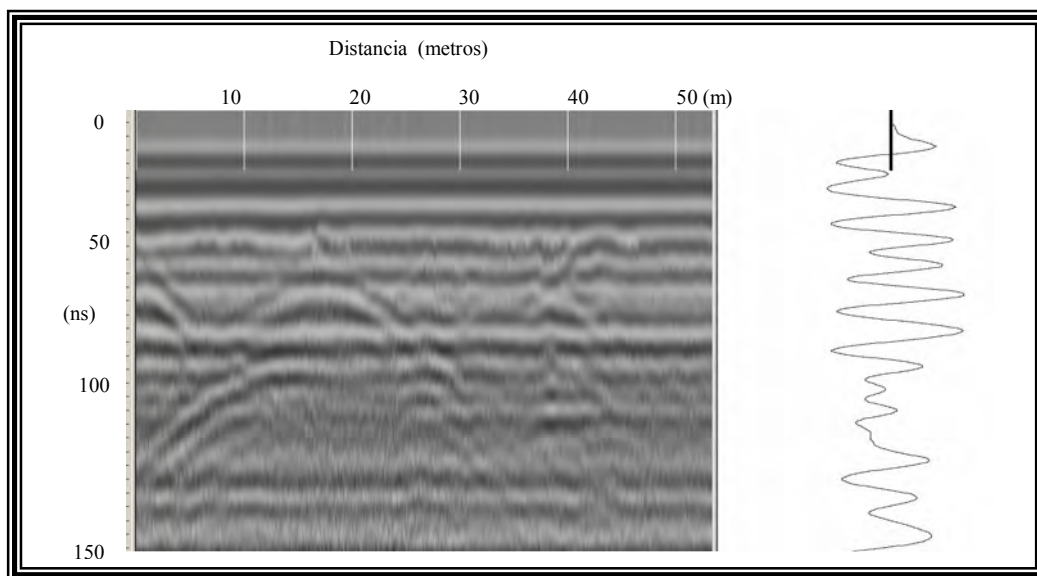


Figura 4.6. Radargrama y traza generada en el sistema de GPR

La idealización para generar este simple caso consiste en un pulso directo, y una sola reflexión de la capa. En el modo de operación con movimiento, la onda del radar es transmitida, se registra cada vez que la antena se ha movido una

distancia (o tiempo), predeterminado en toda la superficie del suelo o material, que está siendo investigado. Si los contrastes en las propiedades eléctricas (por ejemplo el cambio en la permitividad) son relativamente simples, entonces el registro del GPR, tiempo-distancia puede ser visto en una pseudo imagen de dos dimensiones del subsuelo. En el eje horizontal la distancia a lo largo de la superficie y el eje vertical siendo el camino de viaje del tiempo de la onda del radar. Para calcular la profundidad de los objetos, estructuras o rasgos observados, se miden el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción de las señales, pudiendo determinar la distancia al objeto reflectante una vez conocida la velocidad media de propagación de las ondas en los distintos medios que atraviesa la onda.

El registro de tiempo-distancia en el GPR es la forma más simple de mostrar su información para ser interpretada en términos de las características, rasgos y estructuras del subsuelo. Un registro de GPR de tiempo-distancia puede también ser producido por una serie de desarrollo en el modo fijo de medidas a un intervalo constante entre las trazas del subsuelo.

#### **IV.4. MODO DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

Se pueden efectuar la adquisición de datos con el equipo de GPR, con sondeos de reflexión, punto medio común (CMP) y WARR. Para la adquisición por reflexiones se desplazan las antenas transmisoras y receptoras (Figura 4.6) a través de una línea, con una separación fija ( $x$ ); en las antenas monoestáticas el transmisor (Tx) y el receptor (Rx) están en una sola antena, con una separación determinada por el diseño y las frecuencias de operación de ésta. La energía radiada por la antena es transmitida al subsuelo y es reflejada cuando se presenta un cambio en la interfase entre dos medios con diferentes propiedades electromagnéticas.

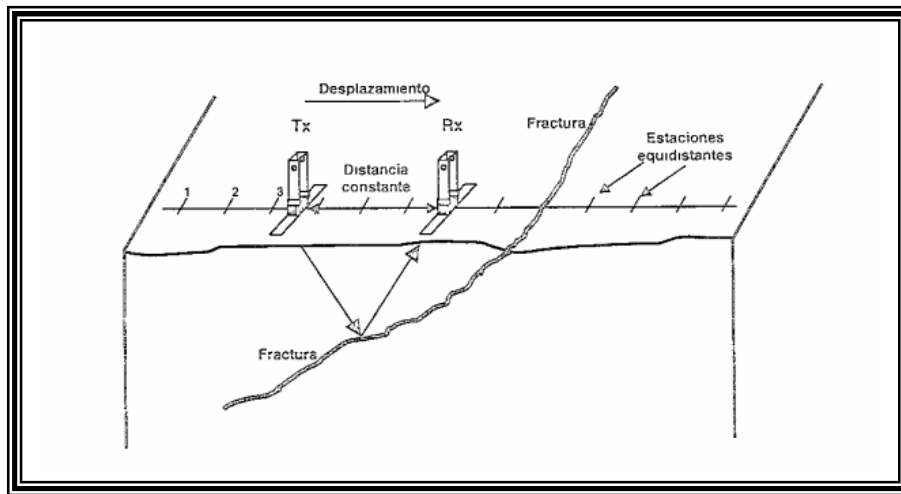


Figura 4.7. Adquisición de datos por medio de reflexión

Los sondeos CMP (common mid-point o Punto Medio Común), se realizan con antenas biestáticas y son empleados para calcular la velocidad de propagación de la señal en uno o varios medios. Las dos antenas siempre deben quedar equidistantes al dicho punto, desplazándolos en intervalos fijos a partir de un punto central en direcciones opuestas sobre el terreno (Figura 4.8).

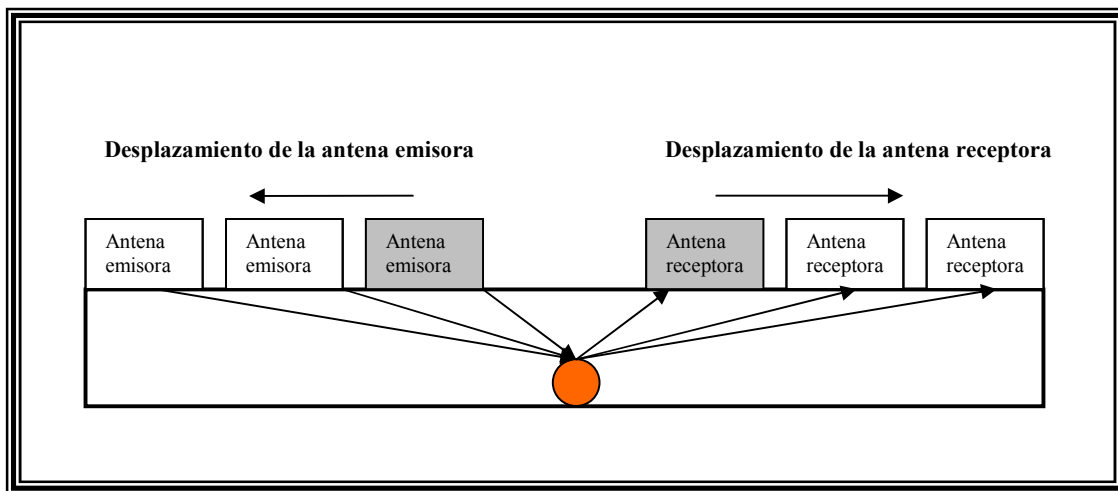


Figura 4.8. Obtención de datos de CMP

### **Adquisición de datos en el área de estudio.**

El área de estudio como se mencionó anteriormente en el capítulo 2, está ubicada al norte de la Ciudad de Aguascalientes, en el Municipio de Jesús María. La adquisición se realizó con un GPR SIR-3000 de Geophysicala, Survey System Inc., con antenas de 70 y 200 MHz, con una separación (offset) fija de 10 m. El estudio se realizó con un desplazamiento fijo, debido que de esta manera se genera amplitudes de reflexión más altas y coherentes, lo que proporciona una mejor resolución y calidad de los datos. La técnica consiste en deslizar la antena a lo largo de la línea de estudio (Figura 4.9), a una velocidad uniforme para obtener un número considerable de escaneos y una tomando así lecturas en puntos equidistantes. Así, los perfiles obtenidos corresponden a una imagen de los cambios en las propiedades dieléctricas del subsuelo (reflexiones) en función del tiempo de tránsito doble.



Figura 4.9. Adquisición de los datos GPR con una antena de 70 MHz, en el fraccionamiento Nuevo Jesús María, en la zona conurbana de la Ciudad de Aguascalientes.

## **IV.5. PROCESAMIENTO**

El procesamiento de datos de GPR, es un paso previo a la interpretación con la finalidad de mejorar la señal. Como se explicó anteriormente las propiedades eléctricas de los materiales en el subsuelo determinan la atenuación, transmisión y reflexión de la señal en su recorrido y la ondícula de la señal es altamente afectada a medida que esta se propaga a través del subsuelo. También existen otros factores que afectan la señal como la geometría, la rugosidad e inclinación de los reflectores. El ruido e interferencia encontrada en las secciones de GPR se puede deber a una serie de factores que influyen:

1. Objetos en la superficie del terreno, donde la antena tuvo que pasar.
2. Cables aéreos de alta tensión, postes de luz o semáforos, árboles, edificaciones, etcétera
3. Objetos enterrados.
4. Señales electromagnéticas de alta frecuencia, generadas por transmisores externos como antenas microondas, teléfonos móviles, etcétera

Algunas de estas fuentes pueden ser despreciables o ser eliminadas con un procesamiento de datos. Para mejorar cada uno de los radargramas se les aplicó un procesado con el Software RADAN. En este proceso se busca resaltar las anomalías que corresponden a los seriales de interés y disminuir o eliminar el ruido.

### **IV.5.1 Edición de los datos.**

#### **IV.5.1.1 Edición de marcas y normalización de distancia.**

Primero se destacan las anomalías producidas durante la medición y se ubican los radargramas para las zonas de interés (geometría), posteriormente se prosigue a modificar las marcas hechas por el GPR, este paso es la edición de marcas y normalización de distancia, permite al usuario establecer una escala horizontal

constante entre marcas y también puede corregir el número de scans entre marcas y corregir las variaciones de la velocidad durante la adquisición. Los criterios para la edición de marcas y normalización dependen de la persona que procesa los datos. En la figura 4.10-a, observamos el radargrama sin editar marcas y sin normalizar y en la figura 4.10-b ya los observamos normalizados a 20 scan/m, y a 10 metros.

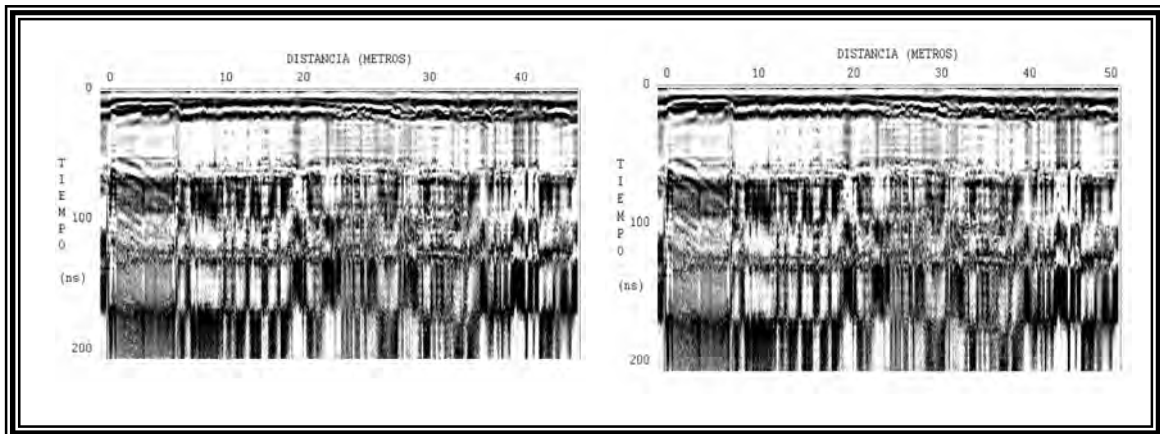


Figura. 4.10 a) Línea original

b) Línea normalizada a 10 m y 20 scans/m

### **IV.5.2. Análisis de la velocidad**

El cálculo de la velocidad de propagación de la onda del radar es de suma importancia porque permite realizar la transformación de los datos de tiempo a profundidad y definir la posición real de los rasgos o estructuras investigados. Existen varias técnicas para realizar este cálculo de la velocidad del medio, pero una de uso común y fácil aplicación, es obtenerla a través de las distintas hipérbolas de difracción presentes en el radargrama (Fisher, 1992).



### IV.5.2.1 Hipérbola de difracción.

Una forma de calcular la velocidad de la onda del radar es a través de la amplitud hipérbolas de difracción. Un ejemplo sencillo para entender la formación de las hipérbolas es el de un tubo metálico enterrado, el cual produce una fuerte reflexión del radar y donde, las ondas electromagnéticas pueden propagarse en todas direcciones.

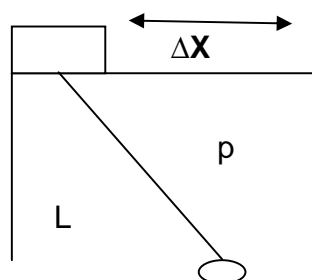
La forma de una hipérbola de difracción va estar definida por la velocidad de la onda, así que adaptando las hipérbolas sintéticas a los datos, se puede obtener la información de la velocidad de propagación de las ondas en el subsuelo.

V es la velocidad de propagación

P, la profundidad del objeto reflector

$\Delta t$ , es el tiempo que retarda la onda desde que sale del emisor, se refleja el objeto y llega el receptor, es decir el tiempo que tarda en recorrer dos veces la distancia entre antena y objeto enterrado.

$\Delta X$  la distancia horizontal entre un punto de la hipérbola y su punto máximo, tenemos entonces:



$$l = \sqrt{p^2 + \Delta x^2}$$

Tenemos que la ecuación de la velocidad es igual a  $V = \text{distancia} / \text{tiempo}$

$$V = \frac{2l}{\Delta t} \quad (4.1)$$

$$V = \frac{2\sqrt{p^2 + \Delta x^2}}{\Delta t} \quad (4.2)$$

$$V^2 = \frac{4*(p^2 + \Delta x^2)}{\Delta t^2} \longrightarrow \frac{4*(V^2 + \Delta t^2)}{4} = (p^2 + \Delta x^2)$$

Despejamos

$$\Delta t^2 = \frac{\Delta x^2}{V^2} - p^2 \quad (4.3)$$

Expresión que adopta la expresión de una hipérbola

$$a = \frac{1}{4} V^2 \quad V = 2\sqrt{a}$$

$$b = -p^2 \quad p = \sqrt{-b}$$

#### **IV.5.2.2 Objeto enterrado conocido.**

El Radar de Penetración Terrestre, se utiliza para estudios de objetos someros, los cuales provocan reflexiones, por ejemplo una pieza de metal como un tubo metálico. En estos casos se puede determinar la velocidad dividiendo el doble de la profundidad conocida entre el camino del tiempo recorrido al objeto (Burger, 2006) es decir:

$$V = \frac{p*2}{t} \quad (4.4)$$

Por ejemplo, una barra de aluminio ha sido enterrada con una profundidad de 57 cm, y el GPR registra que la reflexión proveniente de este objeto se registra a 7 ns, por lo que la distancia a la barra sería  $(0.57) \cdot (2) = 1.14\text{m}$  y el doble tiempo recorrido es 7 ns, entonces la velocidad es  $1.14/7\text{ns}$  igual a  $V=0.16\text{m/ns}$ .

### **IV.5.3. Función de Ganancia y Filtros Pasa Banda**

#### **IV.5.3.1 Función de Ganancia**

La señal del GPR está sujeta a una severa atenuación en la mayoría de los medios que ocurren de manera natural. Por esta razón, así como la fuerza de la señal de GPR normalmente decrece a medida que se incrementa el tiempo, usualmente es necesaria la aplicación de algún tipo de función de ganancia para amplificar las señales más débiles de tiempos posteriores. Los mecanismos de disipación asociados a las propiedades eléctricas de los materiales (pérdida por relajación dieléctrica y conductividad), así como las pérdidas por dispersión esférica también contribuyen a un decaimiento de amplitud general (Annan, 1992).

#### **IV.5.3.2 Filtrado de Datos**

El objetivo del filtrado es por una parte eliminar o reducir aquellas señales que son consideradas como ruido y por otra parte resaltar algunas otras señales. Este proceso es extremadamente importante y no puede ser automatizado. Por esta razón son importantes los criterios de filtrado que utilice el interprete para optimizar y resaltar la información contenida en los datos. Los filtros, por lo general operan sobre las bases de la frecuencia y la amplitud de las trazas (Angulo, 2007), aunque también se pueden usar filtros que actúan sobre su coherencia o su longitud de onda. El software RADAN permite determinar la frecuencia predominante, analizando su espectro, scan por scan usando el formato de osciloscopio (Figura 4.11).

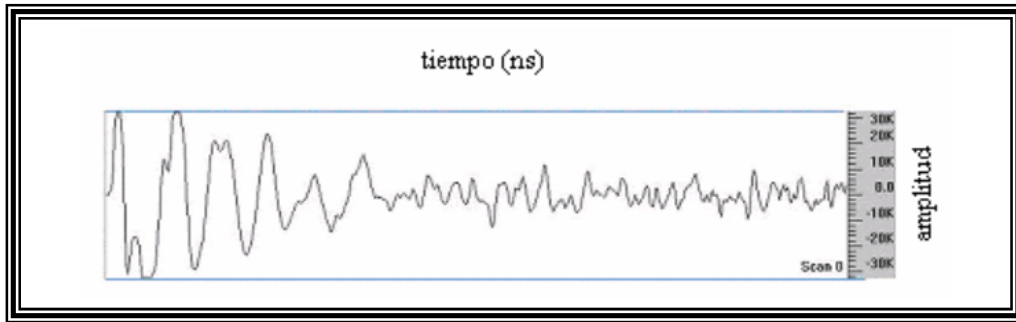


Figura 4.11. Traza en osciloscopio

Los filtros que se ocuparon durante el procesado de los datos del presente trabajo fueron filtros transversales y longitudinales. Los filtros transversales afectan al radargrama en el eje Y (eje temporal), lo que quiere decir que es aplicado independientemente sobre cada una de las trazas. Con ello se busca eliminar el ruido electrónico inherente de cada traza, también se utilizaron algoritmos de filtrado en frecuencia, para eliminar las bandas de ruido de la señal medida. Los filtros longitudinales se aplican en la dirección X, del radargrama. El objetivo de estos filtros es la eliminación del ruido de fondo en la medición, ocasionado generalmente por la irregularidad del terreno (presente en unas cuantas trazas) o por reflectores externos (presente en casi todas las trazas).

Existen muchos tipos de filtros, estos pueden ser de la forma de pasa bajas, pasa altas y pasa bandas. El filtro pasa bandas es el que más se ocupa para remover las señales no deseadas en los datos de GPR. El empleo de los filtros pasa banda tiene como objetivo mejorar la calidad de los datos, de ahí la importancia de escoger adecuadamente las frecuencias de corte. En la figura 4.12 observamos un filtro pasa banda ideal.

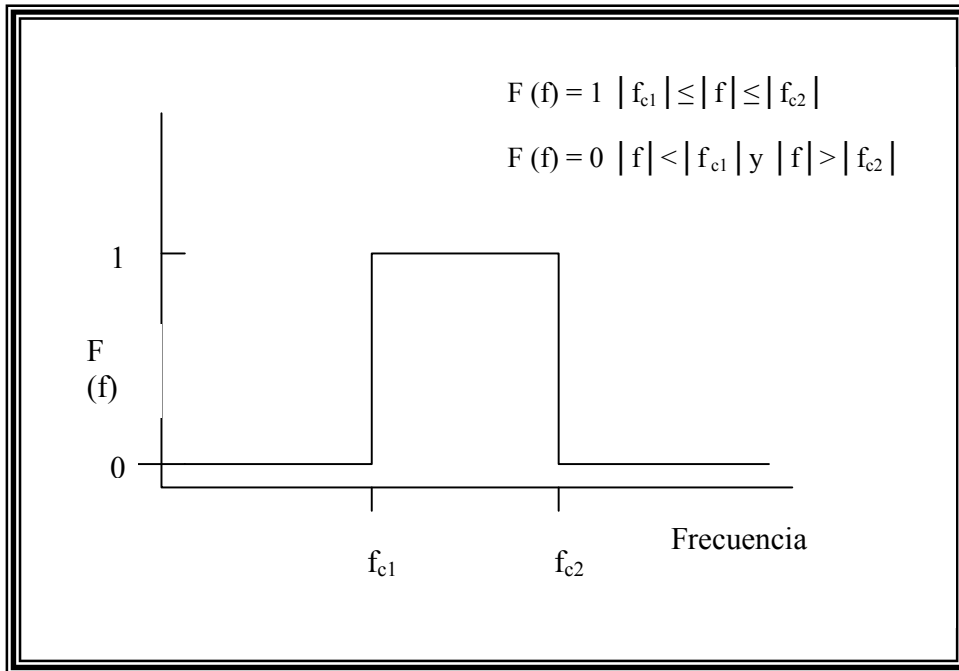


Figura 4.12. Representación grafica de un filtro pasa banda ideal

Los filtros pasa banda utilizados en el RADAN, (GSSI, 1997), son los filtros FIR e IIR que se describen a continuación.

#### **IV.5.3.1 Filtro IIR.**

El filtro IIR es un filtro de respuesta al impulso infinita y se utiliza para la minimización del error medio cuadrático. A modo de ejemplo de la eficiencia de las técnicas de filtrado adaptativo IIR, se observa en la aplicación de detección de frecuencias múltiples y los algoritmos asociados. Un filtro IIR posee una característica especial para los datos de GPR, ya que produce un rendimiento que decae exponencialmente hacia cero, aunque este valor nunca se alcanza, de ahí el nombre "infinito". Los filtros IIR no son necesariamente simétricos y levemente pueden inducir cambios en la fase de los datos. Los resultados obtenidos han mostrado una banda de transición más angosta y una atenuación mínima tan buena o mejor que otros filtros que usan el mismo número de coeficientes en diseños provenientes de la aplicación de la técnica de ventanas.

Los parámetros del filtro IIR le permiten definir el alto y paso bajo horizontal y vertical, así como el intervalo de tiempo que serán tratados, definidos por el inicio y el final muestra el número (por en su defecto en la totalidad de la ventana del tiempo). Las frecuencias de corte se definen en el número de exploraciones en la horizontal y verticalmente MHz.

RADAN utiliza filtros IIR y su implementación tiene un solo polo a fin de que no genere una ruptura brusca en la frecuencia de corte que puede facilitar una cantidad limitada de la reducción del ruido. Como consecuencia de ello, podría ser beneficioso para ejecutar el mismo filtro en más de una vez o bien, otro enfoque consiste en modificar el color de transformación (en el marco de los parámetros de la pantalla del cuadro de diálogo) para ocultar lo que sigue siendo poco ruido en los datos.

#### **IV.5.3.2 Filtros FIR.**

Los filtros FIR tienen una duración de respuesta finita al impulso (FIR, *finite impulse response*) y tienen la ventaja de tener una fase lineal para una respuesta al impulso par o impar. Como tal propiedad es de suma importancia en la práctica, las técnicas de diseño de filtros FIR son de gran interés. Los filtros FIR se producen de manera simétrica y las reflexiones resultantes no será desplazadas en el tiempo o su posición.

Los filtros IIR y FIR, son filtros pasa bandas, que se aplican de manera vertical y horizontal para eliminar el ruido y obtener una sección GPR más limpia. A manera de ilustración aplicamos un filtro IIR, en la figura 4.13a la cual se puede comparar con la sección, en la figura 4.13b, donde el perfil se muestra filtrado y donde es evidente que se ha eliminado una parte sustancial del ruido. La manera en que se eligen los parámetros para el filtro vertical, el espectro de frecuencia, observando en que intervalo existe mayor contenido de información y tomando en cuenta la frecuencia de la antena utilizada. Para el caso del filtro horizontal, se observan los

parámetros de la amplitud de los reflectores horizontales, donde, el más pequeño será el límite inferior y el mayor será el límite superior.

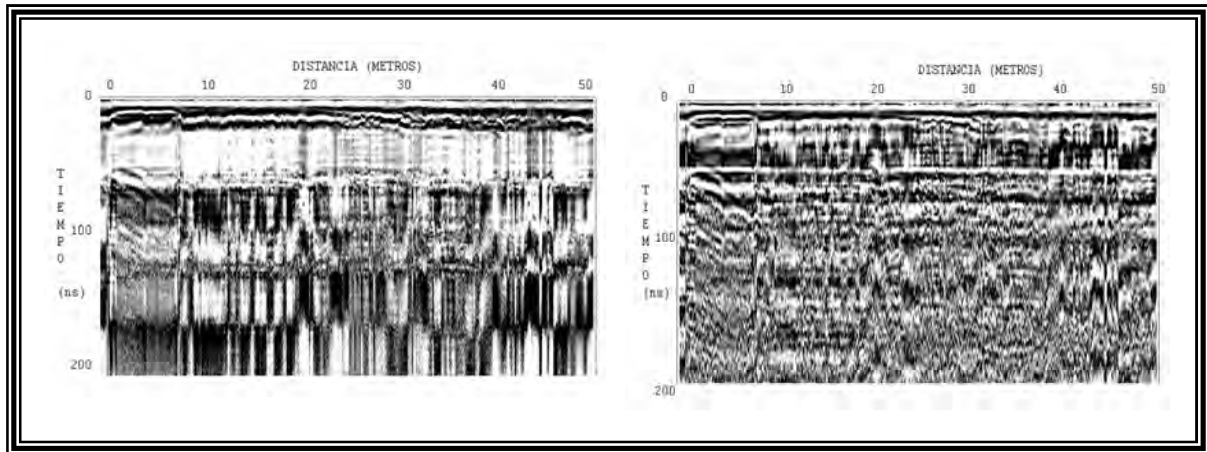


Figura 4.13. a) Línea sin filtrar

b) Línea filtrada

#### **IV.5.4. Deconvolución**

Las propiedades eléctricas del subsuelo, como la permitividad eléctrica causan la atenuación en la energía, que depende de la frecuencia de la señal de la onda electromagnética que se emite. En cierto sentido la Tierra se comporta como un filtro. Cuando la energía de la onda electromagnética reflejada es registrada, está ya no se asemeja a la energía de reflectividad de la Tierra ideal. Matemáticamente el registro de la onda electromagnética puede ser expresado como una convolución de la respuesta de la tierra, representado como una respuesta al sistema. La idealización del sistema de la tierra puede ser representado como una serie de reflectividades (una serie positiva o negativa *polarity impulse spikes*, dependientes de las características de la impedancia del material). Sin embargo, el pulso emitido y las características de la propagación en el medio también determinan la respuesta de la Tierra. La respuesta del subsuelo puede expresarse como el producto de la convolución de la serie de reflectividad de la tierra y con las características propagación del medio y el pulso emitido (Kutrubes, 1994). La deconvolución es una técnica de filtrado que se utiliza para

incrementar la resolución temporal y para suprimir, las señales múltiples de los datos y las reflexiones múltiples. Este tipo de procesamiento opera haciendo el pulso de la antena más pequeño, como si fuese usado un ancho de banda de la señal más amplia, mejorando así la resolución temporal. De acuerdo con el modelo convolutivo cada traza es el resultado de la convolución en el dominio del tiempo de varios eventos que se pueden expresar de la siguiente manera:

$$x(t) = w(t) * e(t) * n(t) \quad (4.5)$$

en donde,

$x(t)$  = registro de la traza del radar

$w(t)$  = el pulso emitido

$n(t)$  = respuesta del sistema (antenas u equipo electrónico),

$e(t)$  = respuesta a la tierra, factores de emisión y del medio de propagación (dispersión atenuación, scattering, etcetera.).

El objetivo de la deconvolución es obtener la reflectividad del medio a partir de todas las operaciones del filtrado, por lo cual la ecuación 4.1 se puede resumir como:

$$t = h * r \quad (4.6)$$

#### **IV.5.4.1 Deconvolución Predictiva**

El software RADAN utiliza un método llamado Deconvolución Predictiva. Este método intenta eliminar efectos de reflejos múltiples que han sido previamente identificados, aproximando la forma de la transmisión de impulsos a la forma en que la antena se acopla al suelo. Basado en la periodicidad de los eventos, tenemos la deconvolución predictiva que se basa en el filtro Wiener (Yan, 2002), el cual utiliza una aproximación estadística para filtrar una parte de la señal producida por algún tipo de distorsión (ruido y múltiples) y que afecta a la señal



recibida. Para la aplicación de este filtro se asume que la señal y la parte de la señal que se desea suprimir se componen de forma estacionaria linealmente (proceso estocástico) y donde las características espectrales son conocidas por su auto correlación y correlación cruzada. Suponiendo una fuente onda de una determinada longitud, llamado el operador de longitud, este filtro predice lo que los datos se asemejarán a una cierta distancia (llamada la predicción de retraso), cuando la fuente se resta de la ondícula (o deconvoluciona) de la misma y resulta en la compresión de la onda reflejada.

#### **IV.5.4.2 Longitud de Operador (Operator length)**

La longitud de operador longitud indica el tamaño del filtro utilizado en términos de tamaño de la muestra. A más largo filtros se intenta dar una mejor aproximación de la onda de radar y, en general mejores resultados, aunque su proceso es más tardado. Una buena regla para comenzar es que la longitud de operador debe ser aproximadamente un ciclo completo de la onda de la antena. Un valor inferior a este le da malos resultados. Para quitar reverberación, en primer lugar se mide la amplitud de un paquete de reverberación en el número de muestras. La predicción del retraso (Lag) debe ser fijado a la longitud deseada de la salida de pulsos (alrededor de la mitad del ciclo de la antena de onda).

#### **IV.5.4.3 Preblanqueado (Prewhitening)**

Este proceso enfatiza los componentes de las frecuencias débiles actuando en una banda de paso limitada, en ocasiones actúa como un filtro entonado con una frecuencia fija. El preblanqueado modifica la función de autocorrelación de impulsar el ruido blanco (sin retraso), matemáticamente, preblanqueado estabiliza el filtro, facilitando la salida y la reducción de ruido. Los valores entre 10 y 80 por ciento son comunes, son buenos, valores para empezar. Aplicar una ganancia adicional puede ser necesario debido a que el proceso de deconvolución atenúa la

señal, especialmente cuando la predicción es a corto retardo. Los valores de ganancia de 3 a 5 son comunes, pero sea cual sea el uso alcanza un nivel de amplitud igual a los datos originales.

En la figura 4.14 se muestra como se aplica la deconvolución una sección hecha en la colonia Del Valle, con una antena de 70 MHz y con un tiempo total de registro de 200 ns. El proceso fue elaborado con deconvolución predictiva (prediction) y se utilizó también un filtrado pasa banda, para eliminar el ruido remanente después del proceso.

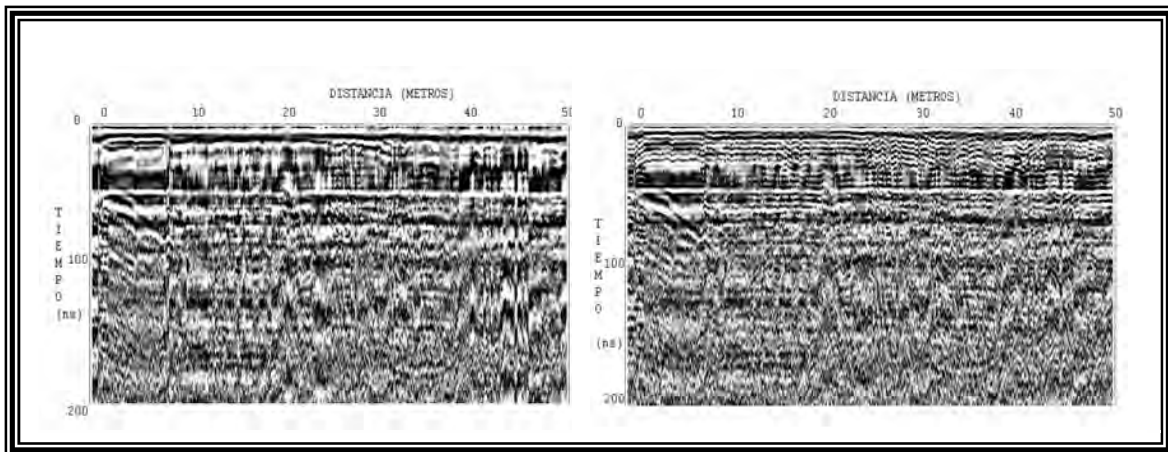


Figura 4.14. a) Línea filtrada

b) Línea aplicándole convolución

Los parámetros que se ocupan en la deconvolución son longitud de operador (operator length), desplazamiento predictivo (prediction lag), preblanqueo (prewhitening) y ganancia (gain), que son descritos a continuación.

### **IV.5.5 Migración**

El proceso de Migración es una técnica de procesamiento que sitúa a los reflectores inclinados en sus posiciones correctas y colapsa las difracciones. Por esta razón la migración puede ser vista como una deconvolución espacial debido a que mejora la resolución espacial (Manual GSSI, 1997). La migración da una imagen de los rasgos y estructura del subsuelo.

En RADAN hay dos métodos para migrar: Kirchhoff y Suma de hipérbolas. En este caso de este estudio se utilizó el de Kirchhoff debido a que este método aplica un factor de corrección al valor promedio, basado en el ángulo de incidencia y distancia de la característica como se describe a continuación.

#### **IV.5.5.1 Principio de Migración**

Considerando el reflector inclinado CD de la sección geológica que se muestra en la figura 4.15. Se requiere obtener una sección offset cero a lo largo del perfil OX. Al mover la fuente y el receptor hacia la derecha, entonces el primer reflector que se graba es A. La llegada de la reflexión A es indicada por el punto C (Figura 4.15b) en la sección de tiempo offset cero. Para ilustrar este ejemplo se supone que el receptor y el transmisor se encuentran en el mismo lugar, y una velocidad del medio es constante es decir  $V=1$ , por lo que la escala de tiempo y profundidad son iguales.

El primer arribo de las reflexiones es el punto A, es registrado por C' y el último arribo en el receptor B, es representado en D' en la sección de tiempo (Figura 4.16b). Podemos observar en la Figura 4.15b que el reflector CD no está en la misma posición, que el evento registrado en C'D'. De esta observación geométrica podemos concluir que la sección C'D' debe ser migrada a su verdadera posición CD (Yilmaz, 1989).

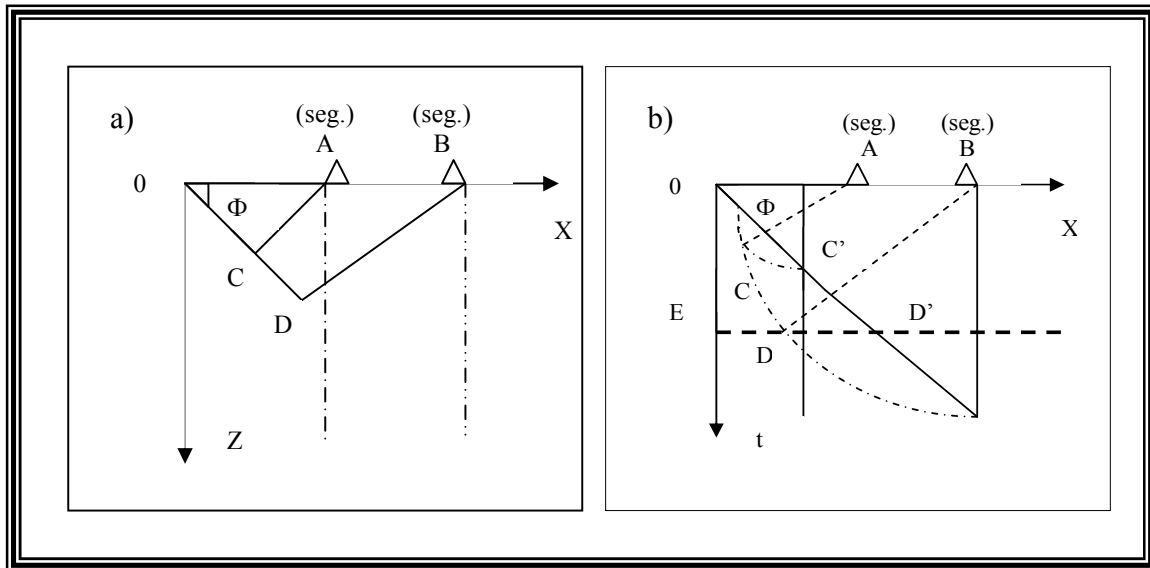


Figura 4.15. a) Reflector inclinado CD de la sección geológica. b) El segundo C'D' migrado en la sección de tiempo, cuando se migran los reflectores se mueven hacia arriba.

#### IV.5.5.2 Método de migración de Kirchhoff

La migración Kirchhoff, o migración de difracción, está basada en una suma de difracciones (suma de amplitudes a lo largo de trayectorias hiperbólicas). Esta es una técnica de aproximación, la cual está basada en un registro de *offset cero*, con difracciones hiperbólicas que son migradas a lo largo de la hipérbola (Figura 4.16). Este método consiste en analizar los datos de entrada en el plano x-t para energías que pudieron haber resultado en una difracción posicionada en un lugar particular en la salida en el plano x-z. Este análisis es llevado a cabo sumando las amplitudes en x-t a lo largo de la curva de difracción. Posteriormente el resultado de esta suma es graficado al punto correspondiente en el plano x-z. Sin embargo, dentro del contexto de la migración en tiempo el resultado de la suma es graficado en el plano x-t, donde t es el tiempo del evento ( $T_0$ ) en el plano de migración. La migración de Kirchhoff para un punto B de la hipérbola se obtiene a través del tiempo para migrarlo a la posición A por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta t^2 = \frac{\Delta x^2}{V^2} - p^2 \quad (4.7)$$

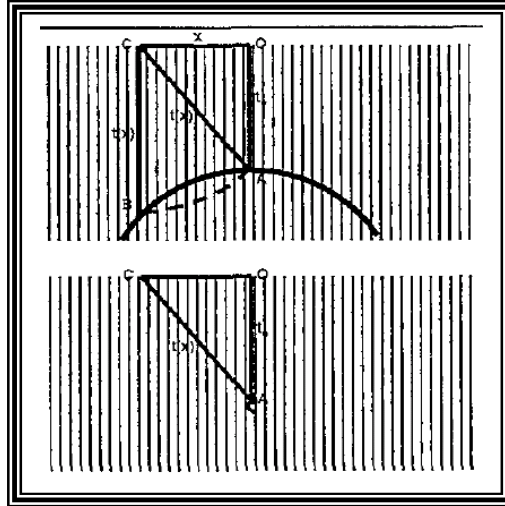


Figura 4.16 Migración de Kirchhoff, cada punto de la hipérbola es trasladado al punto colapsado (Yilmaz, 1989).

Este proceso se repite para cada punto sobre la hipérbola hasta colapsarla a un solo punto. Posteriormente las amplitudes de los puntos se suman entre si para dar la amplitud resultante en la hipérbola. La forma de la ondícula es dependiente de la amplitud y de la fase, por consiguiente se deben considerar algunos factores antes de realizar la suma:

1. El factor oblicuo el cual describe la dependencia de las amplitudes con el ángulo de incidencia.
2. Factor de divergencia esférica el cual es proporcional a  $1/ vr$  para la propagación de ondas.
3. El factor de la forma de la ondícula el cual para una migración esta diseñado con un espectro de fase constante de 45 grados.

#### CAPÍTULO IV. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL MÉTODO DE GPR

La ventaja de este método es que colapsa satisfactoriamente las hipérbolas y corrige inclinaciones pronunciadas. Sin embargo, una de sus desventajas es que la relación señal ruido posterior a la migración puede no ser muy satisfactoria.

En la figura 4.17, observamos el perfil final con la migración de Kirchhoff y podemos observar los resultados del proceso.

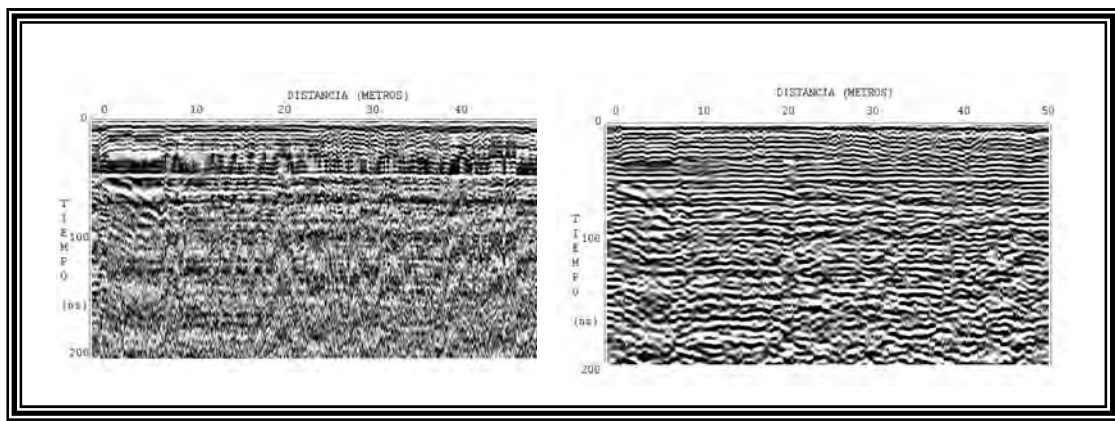


Figura 4.17a) Radargrama convolucionada

b) Radargrama con proceso de migración

## **CAPÍTULO V**

### **ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

#### **V.1 ADQUISICIÓN DE DATOS**

El área de estudio, como se mencionó anteriormente, se ubica al noroeste de la ciudad de Aguascalientes, dentro del Municipio Jesús María y se encuentra aproximadamente a 1300 m sobre el nivel del mar. La topografía del área es regular con muy ligeras variaciones de elevación.

Las secciones de GPR fueron adquiridas perpendicularmente a las fallas ya conocidas (SIDIFAG, 2005). El estudio se planeó de la siguiente manera.

##### **V.1.1 Campaña de adquisición.**

El trabajo de campo y la adquisición de datos, se realizaron en junio del 2008, en las colonias Benigno Chávez, La Loma y los Fraccionamiento Lomas de Jesús María y Del Valle (Figura 5.1), al noreste de la zona Metropolitana de la Ciudad de Aguascalientes. Se utilizó un equipo de GPR, GSSI SIR 3000, con antenas en modo monoestática con frecuencias de 70 y 200 MHz y un offset constante, con modo de operación de reflexión.

Los levantamientos consisten en la transmisión sucesiva de pulsos y su respectiva recepción de la señal (denominada “traza”) durante un cierto intervalo, llamado ventana temporal.





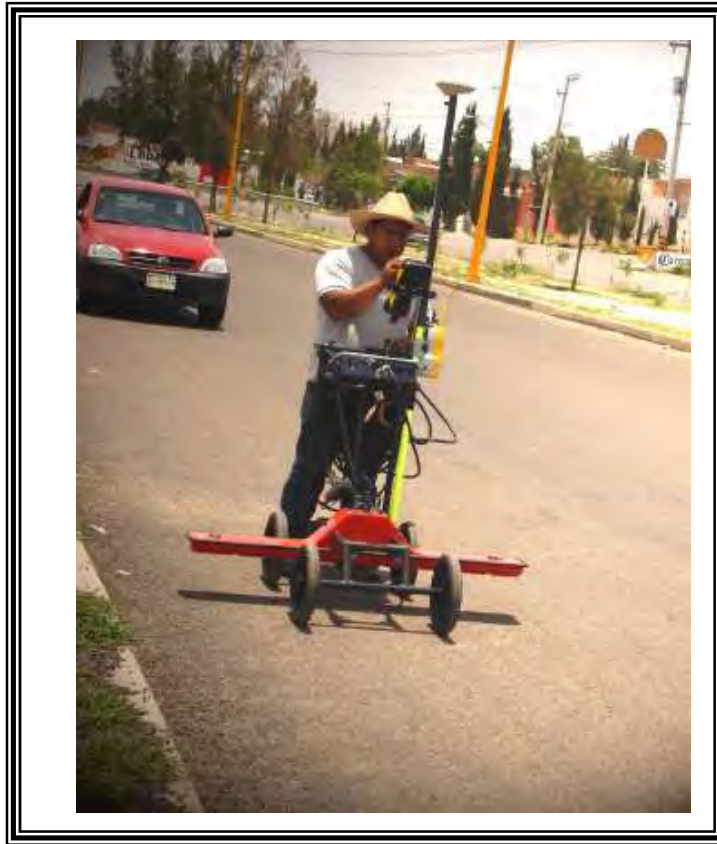


Figura 5.2 Adquisición de los datos

### V.1.2 Características de la zona de adquisición

En el área de estudio se levantaron más de setenta secciones de GPR (Figura 5.1), con una longitud variable entre 30 y 200 metros, utilizando un offset constante entre la antena transmisora y la receptora (antena monoestática). Para fines de presentación de los resultados más relevantes de este trabajo y sólo se muestran 18 secciones GPR que son las secciones más representativas de los rasgos localizados y con frecuencias de 70 y 200 MHz (Tabla 5.1). La antena de 70 MHz se utilizó para cartografiar discontinuidades profundas y la antena de 200 MHz para identificar rasgos más someros, obteniendo de esta manera un buen compromiso entre la profundidad de investigación y el nivel de detalle de los rasgos y estructuras identificados.

**Tabla 5.1. Síntesis de los perfiles utilizados y sus parámetros de adquisición**

sección	Calle	Antena (MHz)	Longitud del perfil (metros)
JM_4	Valle Hermoso	70	87
JM_5	Valle de los Reyes	70	77
JM_15	Valle Hermoso	200	87
JM_16	Valle de los Reyes	200	84
JM_24	Misantla	70	153
JM_28	Bonampank	70	140
JM_34	Misantla	200	183
JM_38	Bonampank	200	177
JM_51	Victoria	70	68
JM_52	Esfuerzo	70	105
JM_57	Victoria	200	160
JM_60	Esfuerzo	200	125
JM_61	Olmo-Almendró	70	119
JM_62	Abedul-Olivo	70	246
JM_63	Olmos-Almendró	200	117
JM_64	Abedul-Olivo	200	256
JM_65	Adolfo López Mateos	70	84
JM_69	Adolfo López Mateos	200	84

Como en cualquier estudio geofísico, y específicamente los de GPR, en la mayoría de los casos es necesario buscar el mejor compromiso entre el tiempo del levantamiento y la resolución de los datos. La selección entre el espaciamiento entre mediciones discretas del radar esta estrechamente relacionada a la frecuencia central de operación de las antenas y también a las propiedades dieléctricas del material del subsuelo involucrado. Con el fin de asegurar que el

muestreo sea satisfactorio (sin presentar efectos de *alias*), no se debe de exceder el intervalo de muestreo de Nyquist (Annan, 2001).

Los datos fueron adquiridos con una separación de 7 metros entre cada marca, a una velocidad constante. El intervalo entre cada traza es de 20 scans/m y 1024 scans, para los datos presentados, la frecuencia central de las antenas fue 70 y 200 MHz. El tiempo de grabación es de 300 y 150 ns, respectivamente, con un muestreo de 10 ns, en la figura 5.3 se muestran las características generales para una sección tomado en el Fraccionamiento del Valle con una antena de 70 MHz.

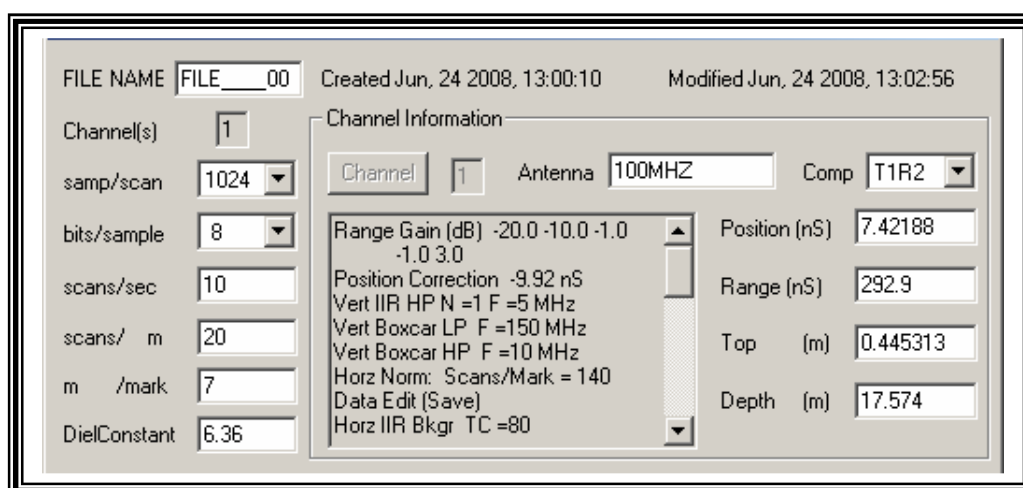


Figura 5.2. Síntesis de los parámetros de entrada para el sistema SIR 3000 para la adquisición para un perfil con una antena de 70 MHz, en el Fraccionamiento El Valle

Otro factor importante, como se observa en la Tabla 5.1, es la consideración de la frecuencia de 70 y 200 MHz y la razón de muestreo, los cuales permitieron una alta resolución en los datos adquiridos. Esto ejemplifica que la selección de la frecuencia de operación para la adquisición de los datos de GPR no es sencilla debido a la dependencia entre resolución espacial y profundidad de penetración.

Todos los datos fueron adquiridos con antenas operando en modo monoestático y las líneas adquiridas fueron planeadas para tratar de cruzar en la medida de lo posible de forma perpendicular a las discontinuidades o fallas visibles en

superficie, después de un reconocimiento visual del área de estudio (ver por ejemplo Annan y Cosway, 1992; Versteeg, 1996).

Las antenas fueron situadas en contacto directo con la pavimentación de calles (comúnmente de asfalto). Estas emiten ondas en forma de pulsos sucesivos que se propagan, se reflejan y/o se difractan en las interfases donde se produce un cambio en la permitividad dieléctrica, causadas por objetos o cambios en la estructura interna del subsuelo. Esto genera rasgos en los radargramas que son susceptibles de identificarse por su forma y posición.

La constante dieléctrica fue calculada a partir de los datos de tiempo y profundidad de un objeto conocido (generalmente tuberías), asumiendo que el material es homogéneo lineal e isótropo. Esta propiedad del medio se calculó a partir del desarrollo matemático que se presentó en el capítulo IV, dando paso a la ecuación 4.3, que adopta la ecuación de una hipérbola:

$$\Delta t^2 = \frac{\Delta x^2}{V^2} - p^2$$

Como observamos, al menos someramente el subsuelo del área estudiada, tiene una conductividad media y la atenuación no es muy alta, por lo que ofrece condiciones razonables para el trabajo con GPR.

### **V.1.3 Cálculo de la Velocidad**

El cálculo de la velocidad de propagación de la onda del radar, es de suma importancia porque permite realizar una transformación adecuada de los datos a una escala de profundidades y definir la posición real de los objetos y estructuras del subsuelo. Existen varias técnicas para realizar este cálculo, pero una forma de fácil aplicación común es obtenerla a través de las distintas hipérbolas de reflexión

presentes en el radargrama. La amplitud de una hipérbola de reflexión estará definida por la velocidad de la onda en el medio, así que adaptando las hipérbolas sintéticas a los datos observados, se puede obtener una aproximación muy satisfactoria de la velocidad de propagación de las ondas en el subsuelo, como se puede ver a continuación:

Donde  $V$  es la velocidad de propagación,  $P$ , la profundidad del objeto reflector,  $\Delta t$ , es el tiempo que retarda la onda desde que sale del emisor, se refleja el objeto y llega de nuevo al receptor, es decir el tiempo que tarda en recorrer dos veces la distancia entre la antena y el objeto embebido en el medio y finalmente  $\Delta x$  es la distancia horizontal entre un punto de la hipérbola y su punto máximo. De esta manera tenemos que:

$$\Delta t^2 = \frac{\Delta x^2}{V^2} + p^2 \quad (4.3)$$

La cual es una expresión que adopta la expresión de una hipérbola:

$$a = \frac{1}{4}V^2 \qquad V = 2\sqrt{a}$$

$$b = -p^2 \qquad p = \sqrt{-b}$$

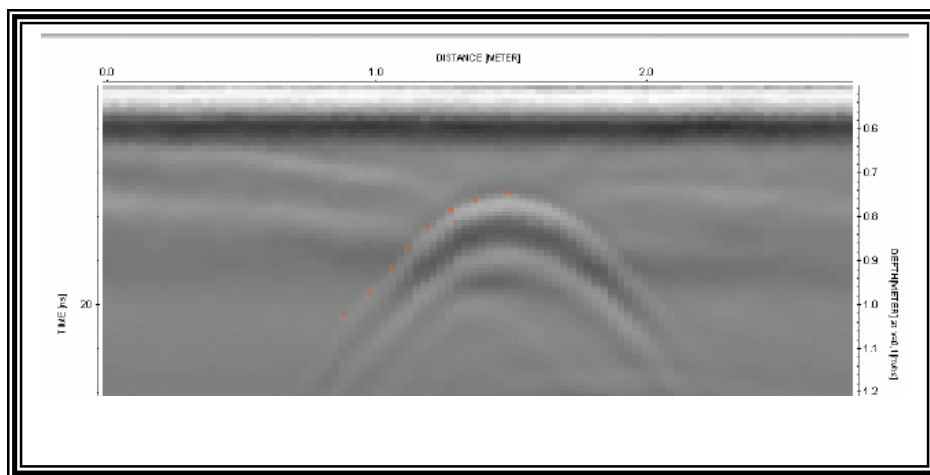


Figura 5.4. Ejemplo de marcas (distancia/tiempo) para obtener un ajuste lineal de una semihipérbola.

La propagación de la velocidad de las ondas electromagnéticas, fueron calculadas a través de las hipérbolas de difracción y los resultados de las velocidades fueron similares. Esto es esperado dado que la posición de las secciones (ver figura 5.1) es muy cercano y no se presumen variaciones sustanciales en la composición de las unidades estratigráficas someras en el área de estudio. El promedio de velocidad de propagación de ondas de radio en el subsuelo fue determinado por la apariencia de las hipérbolas de reflexión (Yilmaz, 1987). La llegada de la onda de aire/suelo, así como otras reflexiones hiperbólicas presentes a 100 y 300 ns, permitió el análisis que resulto en velocidades entre 0.117 y 0.109 m/ns. En este proceso, el error está normalmente asociado a la incertidumbre en la estimación de la amplitud de la de la hipérbola, Las consecuencias de este cálculo en estimación de la velocidad, y por lo tanto en la profundidad de los rasgos identificados en los radargramas, se presentan en la discusión de resultados.

## **V. 2 PROCESAMIENTO DE DATOS**

El procesamiento de los radargramas se realizó con RADAN (Geophysics Survey System, 1995). La secuencia del tratamiento, incluye la edición de archivos para la normalización a una escala horizontal constante (esto se debe a las pequeñas diferencias en la velocidad de movimiento de la antena durante la recolección de datos), la corrección de tiempo cero, la aplicación de ganancias (automática por ventanas de tiempo y variante en el tiempo) para contrarrestar el efecto de la atenuación de la señal a medida que se propaga en el subsuelo y por la pérdida de conductividad en los sedimentos. Los datos fueron filtrados para mejorar la imagen de los radargramas y facilitar la interpretación. También se emplearon para suprimir las frecuencias en anchos de banda preestablecidos y eliminar eventos de determinada duración espacial. Se aplicaron ganancias para resaltar la amplitud de la señal y se aplicó un filtro convolutivo.

Para estimar la velocidad media de las ondas electromagnéticas se utilizó una aproximación de la velocidad media del material (que están directamente relacionadas con la geometría de reflexiones hiperbólicas) y son originadas por fuentes puntuales. Una vez que se obtuvieron las velocidades de propagación, se aplicó el algoritmo de migración de Kirchoff para colapsar las hipérbolas de difracción y así obtener geometrías y profundidades reales y para corregir la posición de los reflectores en la superficie. (Grandjean y Gourry, 1996; De´robot y Abraham, 2000; Orlando, 2003). En la figura 5.4 se presenta un ejemplo de una sección GPR procesada que fue levantada en el fraccionamiento Del Valle con las características de procesamiento que se detallan en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2. Parámetros del procesamiento de datos para el radargrama JM\_4 adquirido en el Fraccionamiento del Valle**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Offset cero (Corrección por posición)	-9.92 ns
Normalización Scans/Mark	100
FILTRO IIR	Horizontal =80 Horizontal =5 Vertical =20 MHz Vertical =205 MHz
Deconvolucion predictiva	N=70 Lag=25 PreWhite=10 Ganancia 5.0 Horz Boxcar Bkgr N=75
Migración	Migración de Kirchoff con ángulo 25 Velocidad 0.117 m/ns

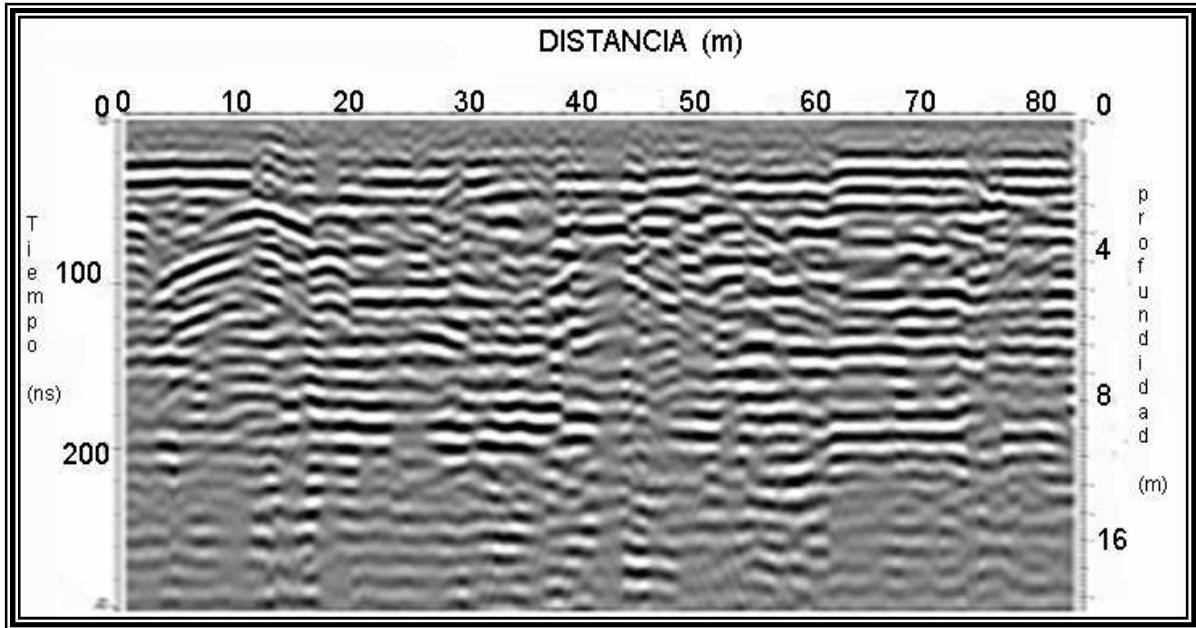


Figura 5.4. Ejemplo de Radargrama procesado. Esa sección se adquirió en el fraccionamiento Del Valle.



## **CAPÍTULO VI**

### **INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

Los registros de las reflexiones describen el comportamiento de los pulsos electromagnéticos, estos son representados en perfiles de dos dimensiones y son llamados radargramas, donde los ejes representan el camino y doble tiempo de viaje de la señal ( $x$  igual a distancia y  $t$  el tiempo en segundos). En las siguientes secciones, los radargramas muestran los resultados de las secciones realizadas con el GPR, al noreste de la zona Metropolitana de la Ciudad de Aguascalientes.

#### **VI.1 Resultados de los perfiles adquiridos**

La superficie en la zona Metropolitana de la Ciudad de Aguascalientes muestra en algunas rupturas superficiales sobre y cerca de zonas de fallas cartografiadas previamente (SIDIFAG, 2007). La caracterización de estas estructuras con la técnica GPR consiste en determinar su posición, arreglo geométrico y profundidad. Para ello, se determinó de manera no invasiva las trayectorias por las cuales las fallas reconocidas en superficie pudieran afectar las estructuras civiles de la zona de estudio.

El total de secciones que fueron levantadas con el GPR fueron treinta y cinco, en cada calle se utilizaron las antenas de 70 y 200 MHz, obteniendo un total de setenta secciones con ambas antenas en las cuatro colonias que principalmente son afectadas por fallas y fracturas (Figura 5.1 y 6.1). De estas 70 secciones adquiridas se eligieron de dos a tres calles por cada colonia, utilizando antenas de 70 y 200 MHz, para la correlación en superficie de las estructuras y rasgos observados en los de los radargramas, la demás información esta resumida en un mapa de fallas que se explicara un poco más adelante.

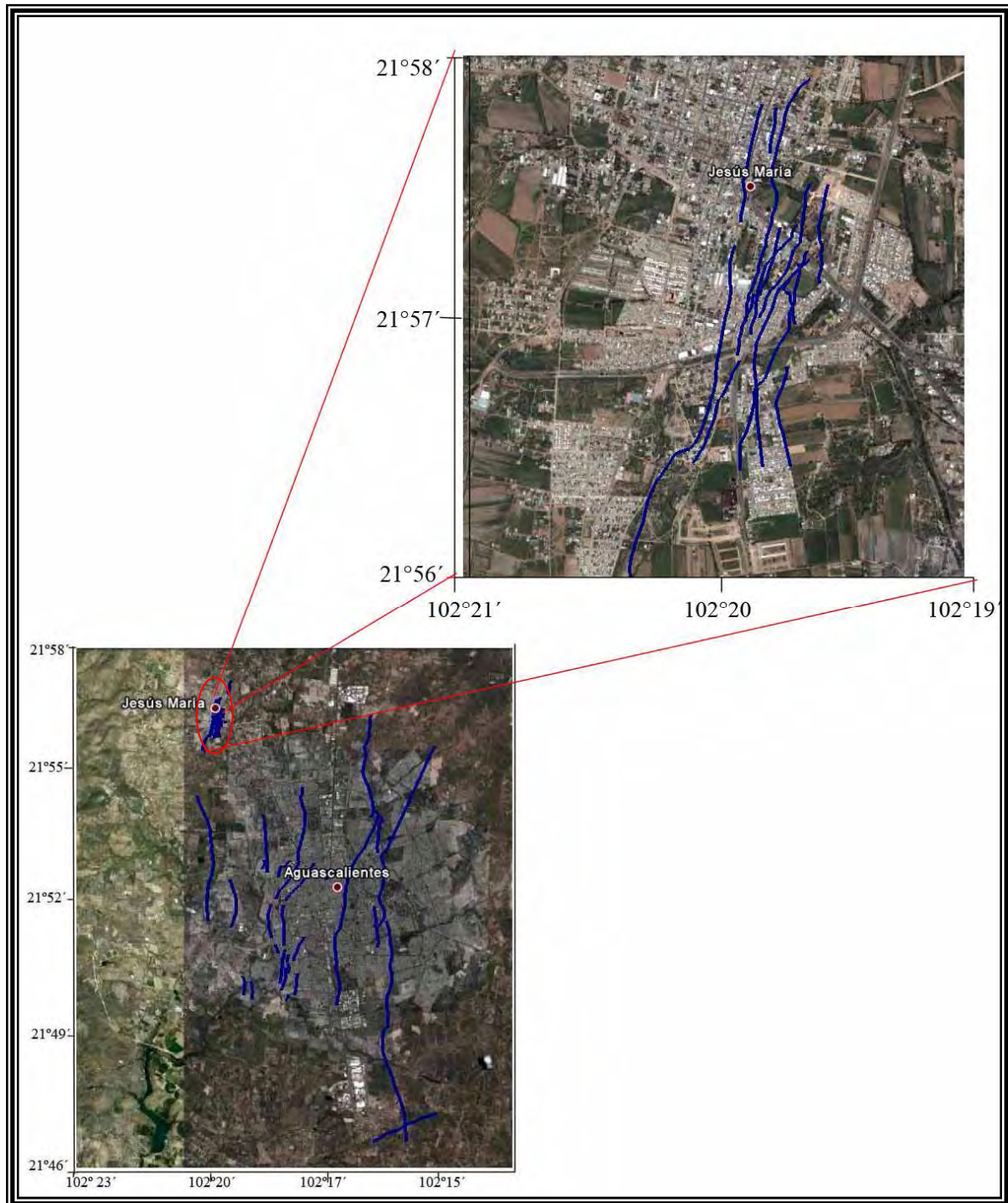


Figura 6.1 Mapa del área de estudio (círculo rojo) en las cuatro colonias que principalmente son afectadas por las fallas (líneas azules) de la zona Metropolitana de la Ciudad de Aguascalientes.

### VI.1.1.2 Fraccionamiento El valle

En el Fraccionamiento Lomas del Valle, se adquirieron las secciones de GPR en las calles Adolfo López Mateos, Valle Hermoso y Valle de los Reyes con antenas de 70 y 200 MHz, las secciones se adquirieron perpendiculares a la falla, como se observa en la figura 6.2.

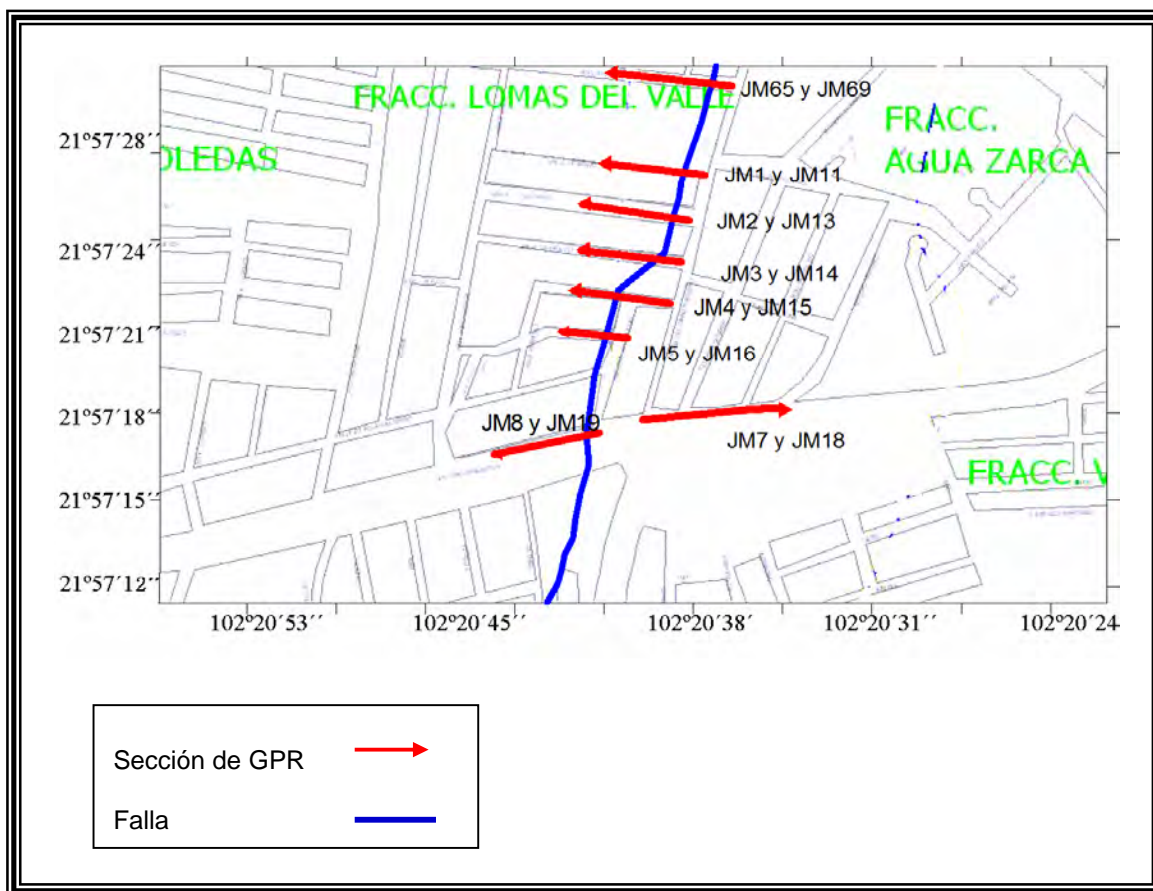


Figura 6.2. Mapa de localización de las secciones adquiridas en el Fraccionamiento el Valle, las líneas rojas son las secciones ocupadas en el procesamiento de datos y la línea azul la falla de afectación.

Las secciones JM65 y JM69 (Figura 6.2 y 6.3), fueron adquiridas en la Calle Adolfo López Mateos, en los radargramas podemos observar entre los 35 y 43 metros, rasgos sumamente marcados, dos líneas azules parecen ser las fallas de afectación, (Figura 6.4). Con la antena de 70 MHz podemos observar que las

difracciones se observan entre 20 y 300 ns, los estratos son homogéneos, alrededor de los 40 ns se observa una ligera alteración del subsuelo, entre los 36 y 46 metros de distancia.



Figura 6.3. Calle Adolfo López Mateos, la flecha roja indica la zona de afectación en la calle, que ha sido reparada con un nuevo pavimento

La sección JM69 (Figura 6.5), adquirida con la antena de 200 MHz se observan estructuras más someras, las líneas azules representan fallas que tienen una profundidad entre los 0 y 5 metros de profundidad.

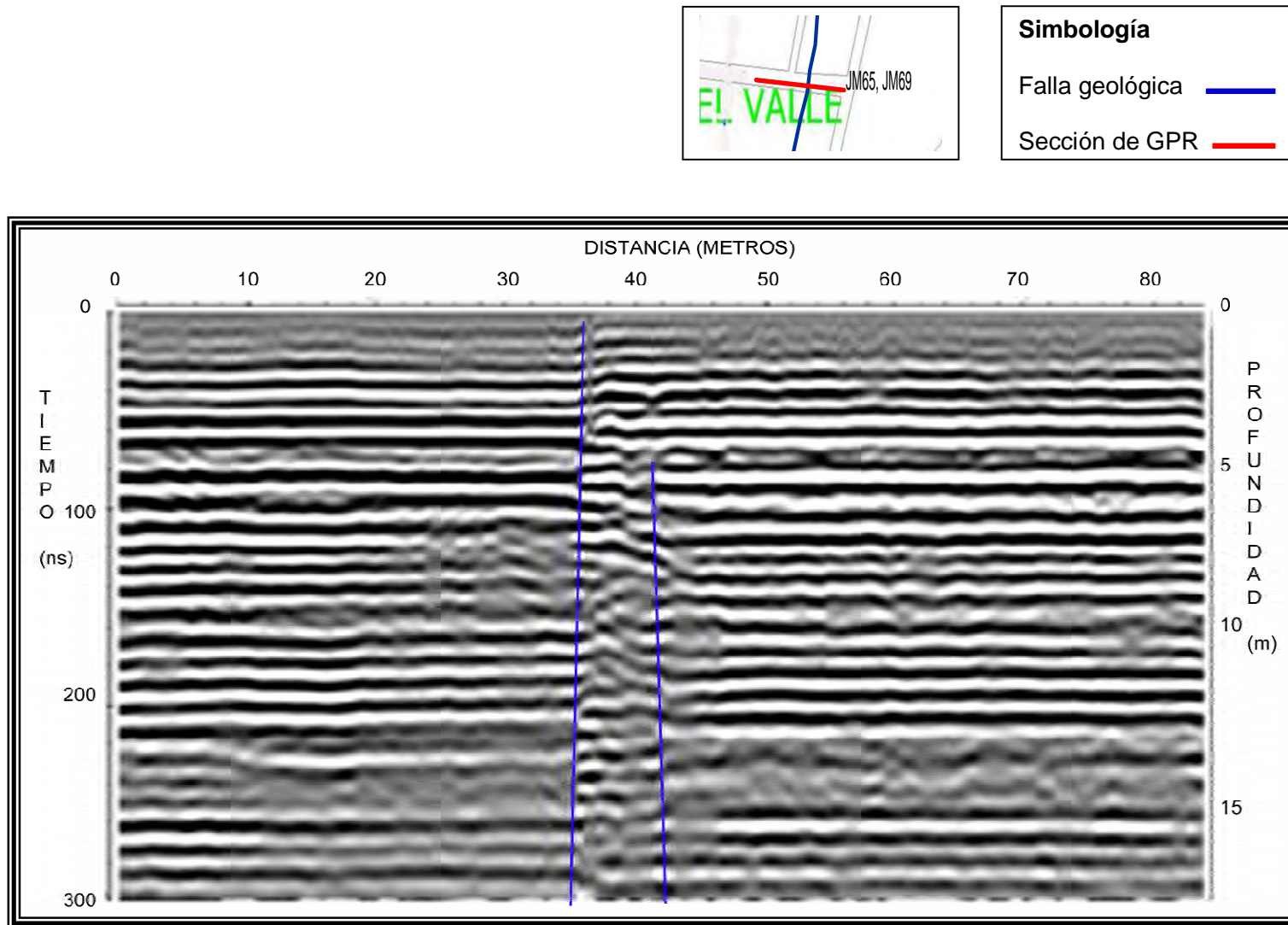


Figura 6.4. Antena 70 MHz, sección JM65, calle López Mateos

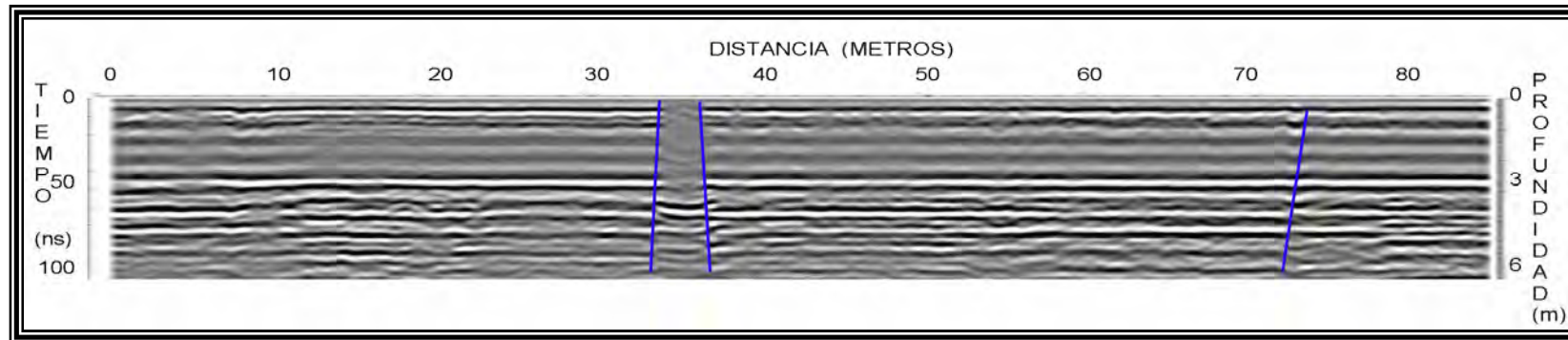
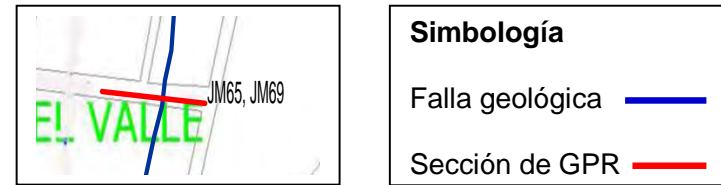


Figura 6.5. Antena 200 MHz, sección JM69, calle López Mateos

## **b) Calle Valle Hermoso**

Las figuras 6.6 y 6.7, muestran las secciones GPR de 70 y 200 MHz, obtenidas a lo largo de la calle Valle Hermoso (Figura 6.2, secciones JM4 y JM15), así como su interpretación estructural. La figura 6.6, es la sección JM4 fue adquirida con una antena de 70 MHz, se puede observar la presencia de fallas que se presentan con líneas azules, las cuales afectan desde los reflectores más profundos hasta los más someros. Además, se aprecia cierta curvatura cóncava hacia abajo en las difracciones. Las líneas azules representan fallas que provocan deformaciones, como desplazamientos o ruptura en la superficie, algunas de ellas observadas en superficie. Por su parte, la figura 6.7, muestra la sección JM15 adquirida con la antena de mayor frecuencia (200 MHz), en la misma calle, se pueden observar deformaciones frágiles de alto buzamiento que afectan a los reflectores. El radargrama mide 87 metros, entre los 40 y 58 podemos observa un desplazamiento de unos 10 cm. En esta distancia de ambas secciones adquiridas en la calle Valle Hermoso se observa la repavimentación de la calle, confirmando lo que se observa en los radargramas (figura 6.8).



Figura 6.8. En la foto se observa el repavimentado, para reparar los daños ocasionados por la falla.

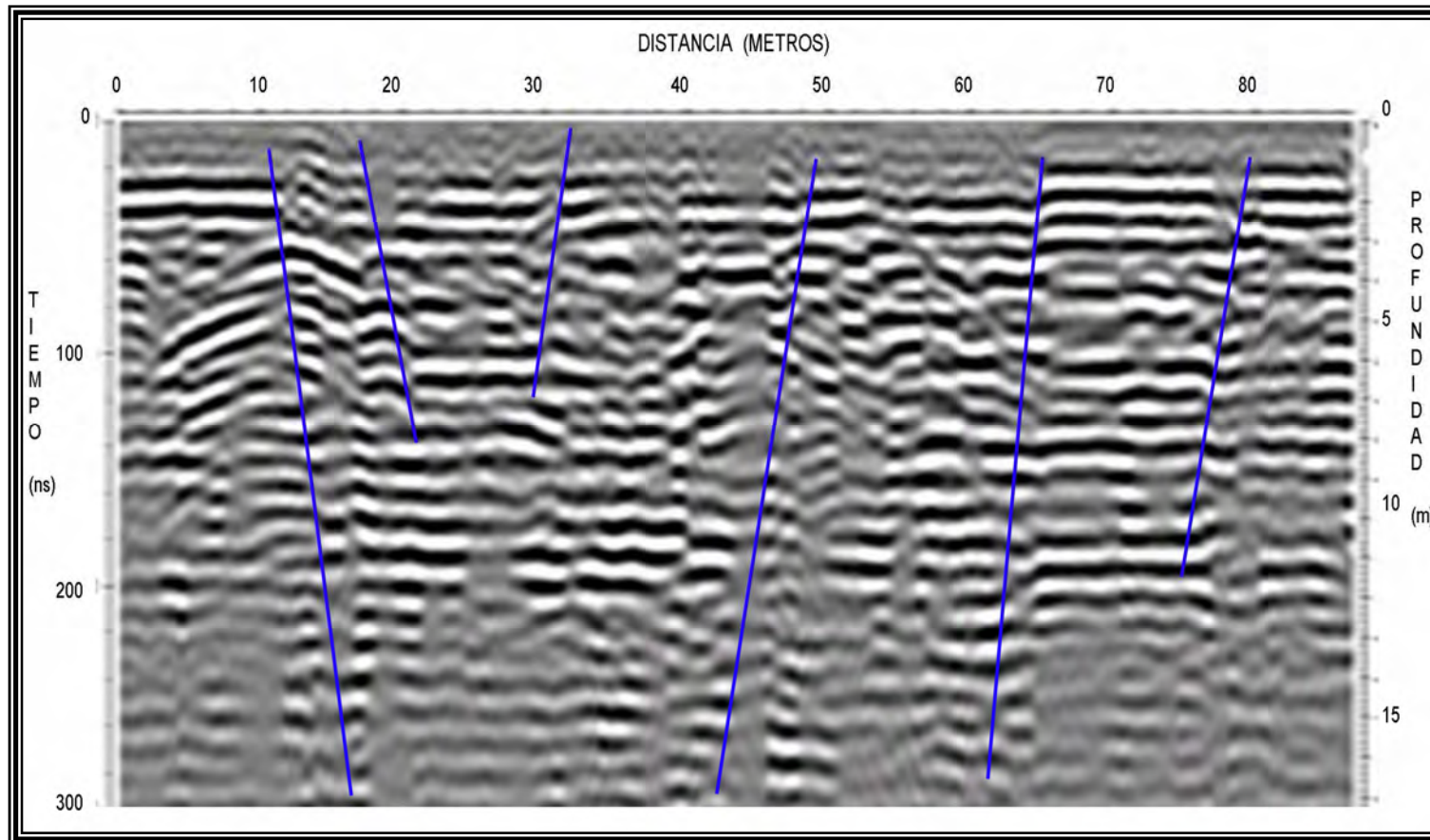
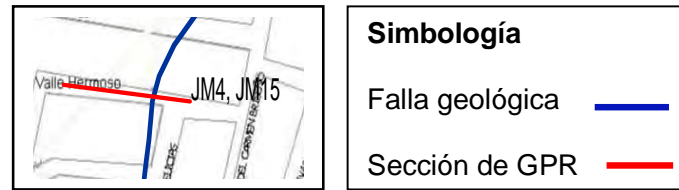


Figura 6.6. Sección JM4 en la calle Valle Hermoso con una antena de 70 MHz



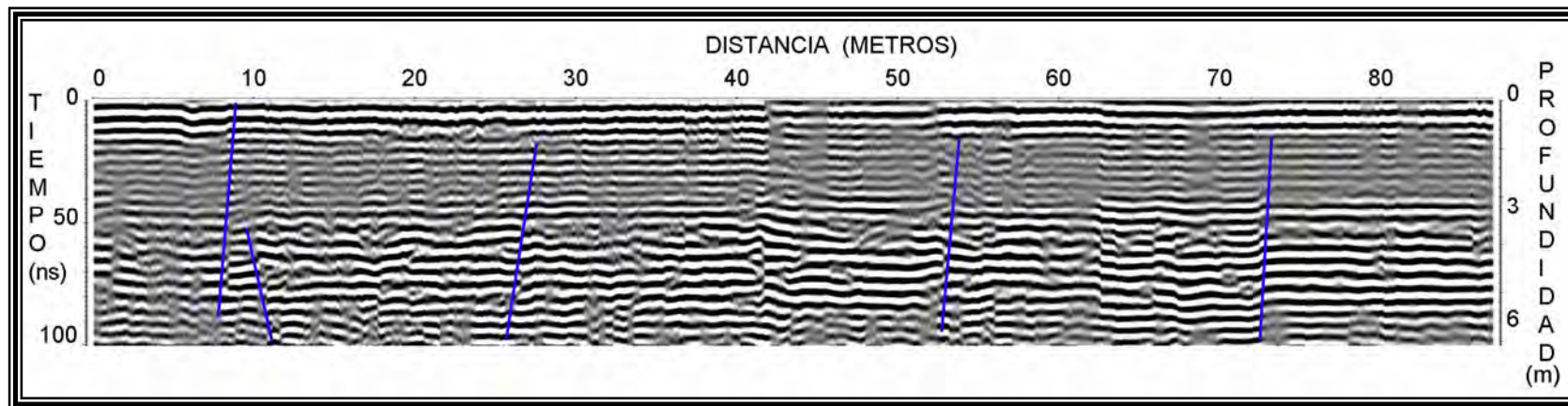
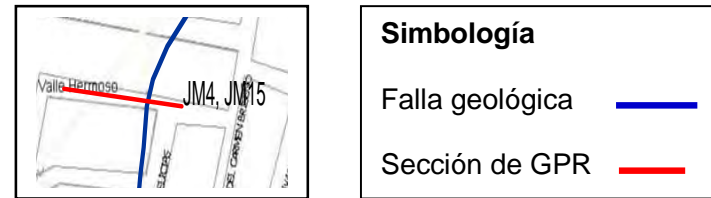


Figura 6.7. Radargrama JM15, obtenido con una antena de 200 MHz en la calle Valle Hermoso

### c) Valle de los Reyes

En la sección JM5 se adquirió en calle Valle de los Reyes (Figura 6.2), en esta calle se encuentra un centro de salud, donde se observa el paso de la falla (Figura 6.9).



Figura 6.9. Centro de Salud Comunitario del Fraccionamiento del Valle

La sección JM5 (Figura 6.10) fue adquirida con una frecuencia de 70 MHz. La interpretación de las posibles fallas se basa en tres criterios principales, el desplazamiento de la reflexión sobre los lados de la línea de falla (líneas azules), la presencia de difracción hipérbola, y la drástica disminución de la amplitud a lo largo del plano de falla (línea azul). Con la antena de 200 MHz (Figura 6.11) realizamos una comparación para observar estructuras más someras, las líneas azules representan pequeñas rupturas en la superficie, en esta sección, al igual que la figura 6.10 se observan dos posibles fallas entre los 2 y 10 metros de profundidad.

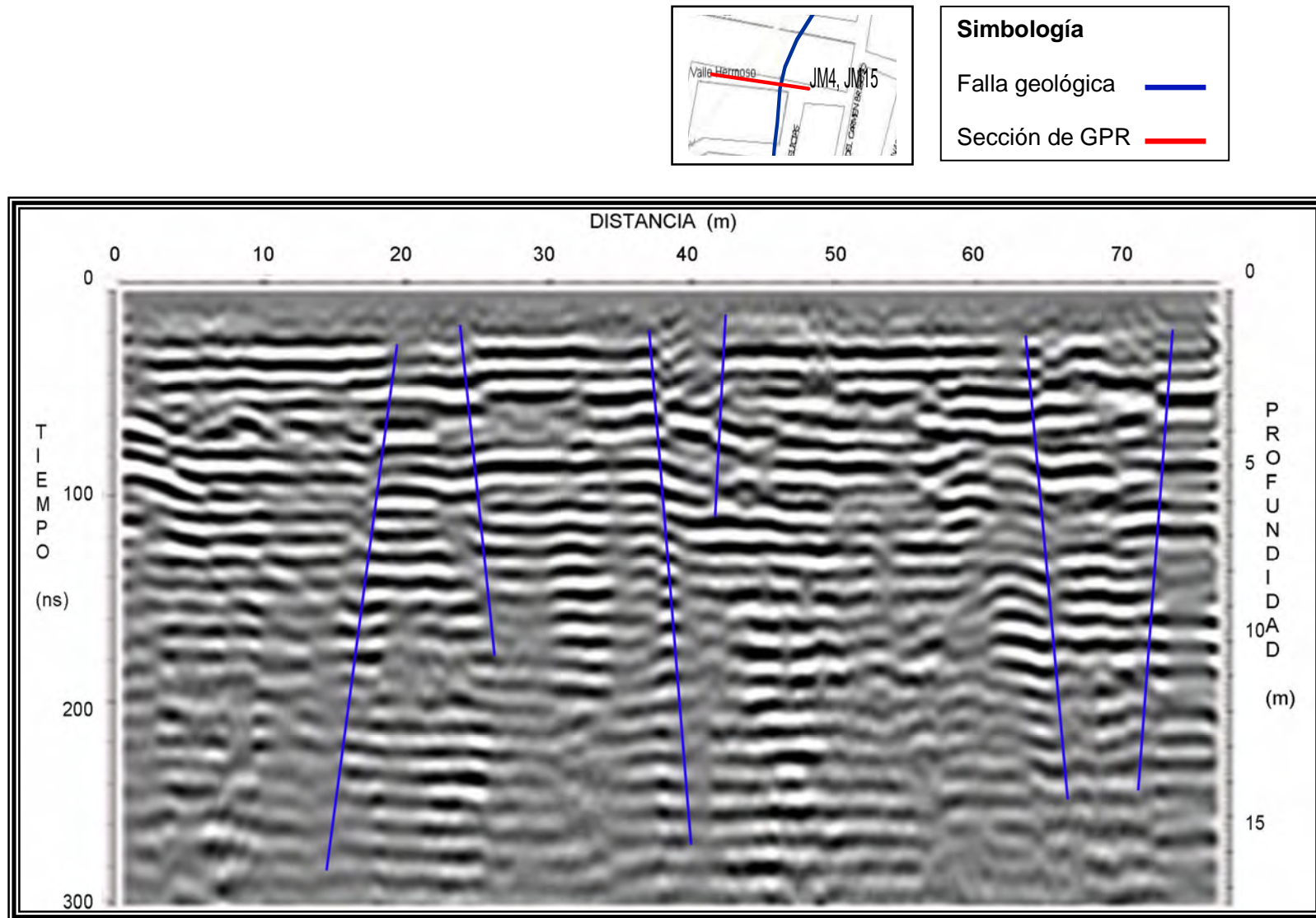


Figura 6.10 Radargrama JM5, adquirido en la calle Valle de los Reyes con una antena de 70 MHz

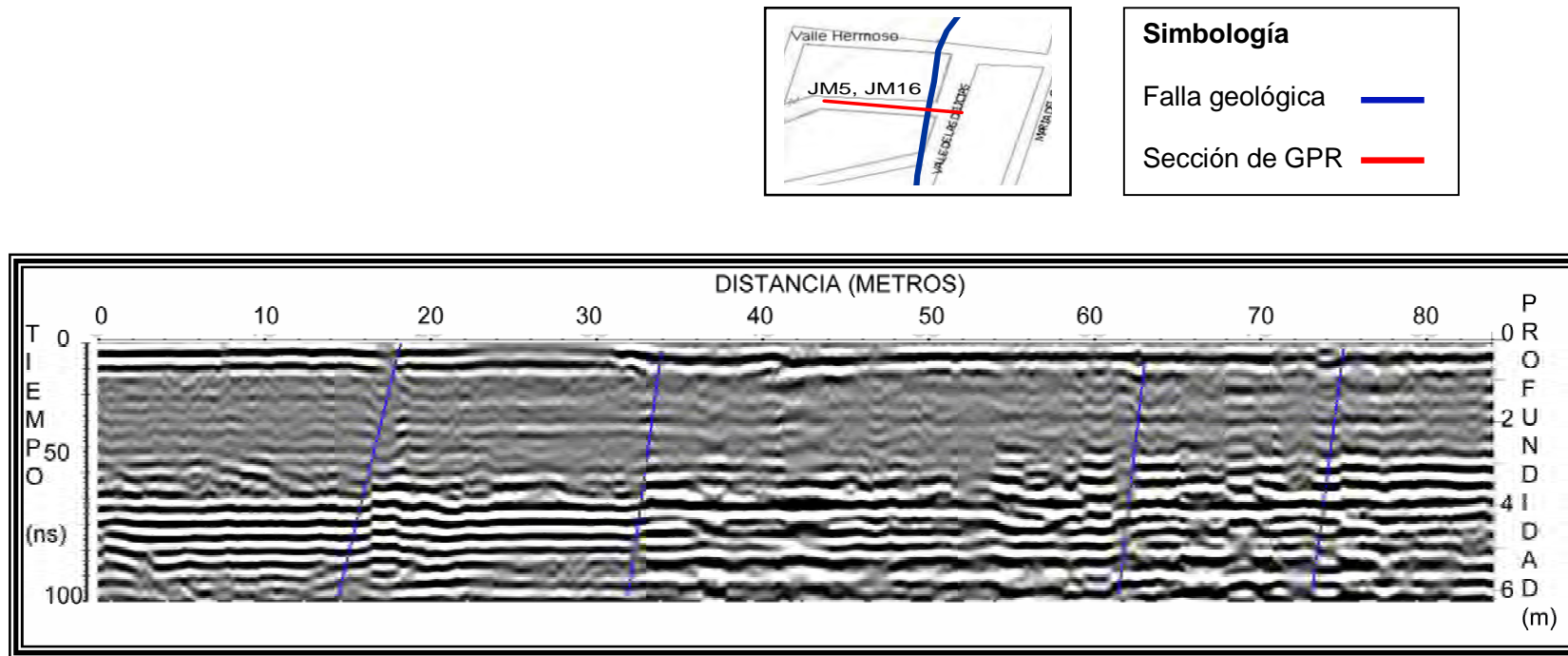


Figura. 6.11. Sección JM16, en la calle Valle de los Reyes con una antena de 200 MHz

### VI.1.1.3 Fraccionamiento Jesús María

Fraccionamiento Jesús María se adquirieron las secciones de GPR en las calles Misantla y Bonampank con antenas de 70 y 200 (Figura 6.12)

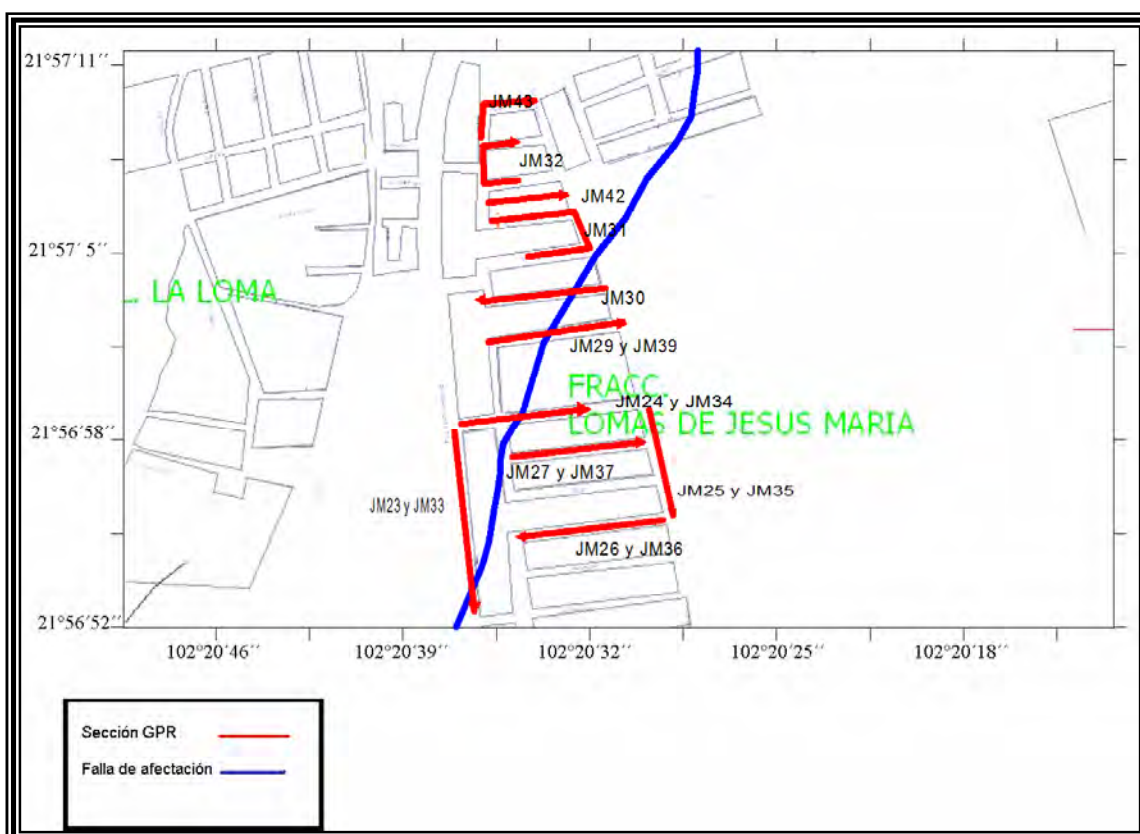


Figura 6.12. Mapa de localización de las secciones adquiridas en el Fraccionamiento el Valle, las líneas rojas son las secciones ocupadas y la línea azul la falla de afectación.

#### d) Calle Misantla

Las secciones JM24 y JM34 se levantaron a lo largo de la calle Misantla, se utilizaron antenas de 70 y 200 MHz. En la figura 6.13 (sección JM24) se utilizó la antena de 70 MHz, se observan varias difracciones hiperbólicas, localizadas entre 50 y 140 ns.

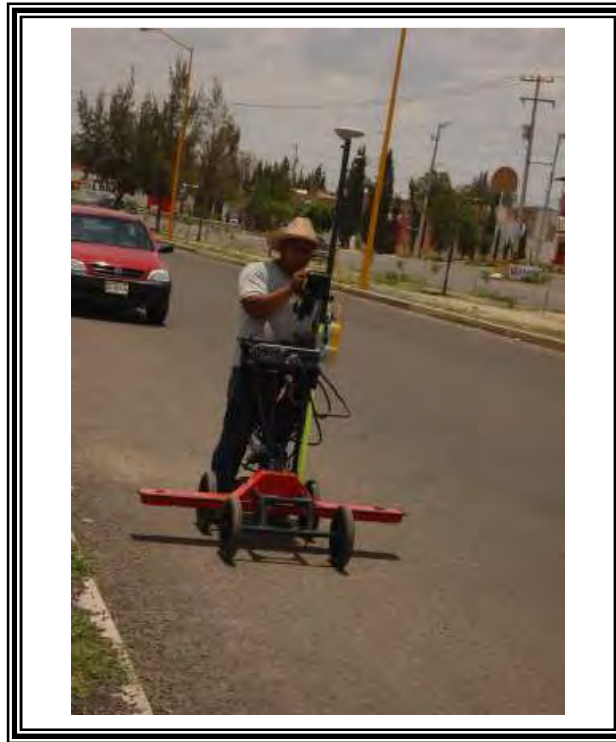
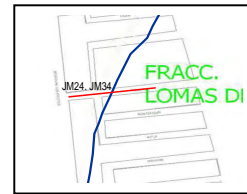


Figura 6.13. Adquisición del perfil JM34 en la calle Misantla con la antena de 70 MHz

A los 57 metros de distancia se interpreta con una línea azul una falla, sin embargo, otras tres fallas se pueden interpretar entre 80 y 100 metros. La parte superior del perfil, se observa deformación en la superficie provocada por la subsidencia. Mientras la sección JM34 (Figura 6.15) obtenida con la antena de 200 MHz, podemos observar que partir de los 80 metros hasta los 100, no se observa estructuras que afecten la superficie del terreno y solo se observan la estratificación natural en el subsuelo. En esta figura las discontinuidades son indicadas con líneas azules y se presentan a partir de los 0.2 hasta los 5 metros de profundidad, alrededor de los primeros 20 ns, las líneas de color azul nos indican discontinuidades, que son asociadas a las fallas, que se observan más claramente en la figura 6.14 y se encuentran ubicadas a la misma distancia de ambos radargramas.



**Simbología**

Falla geológica ———

Sección de GPR ———

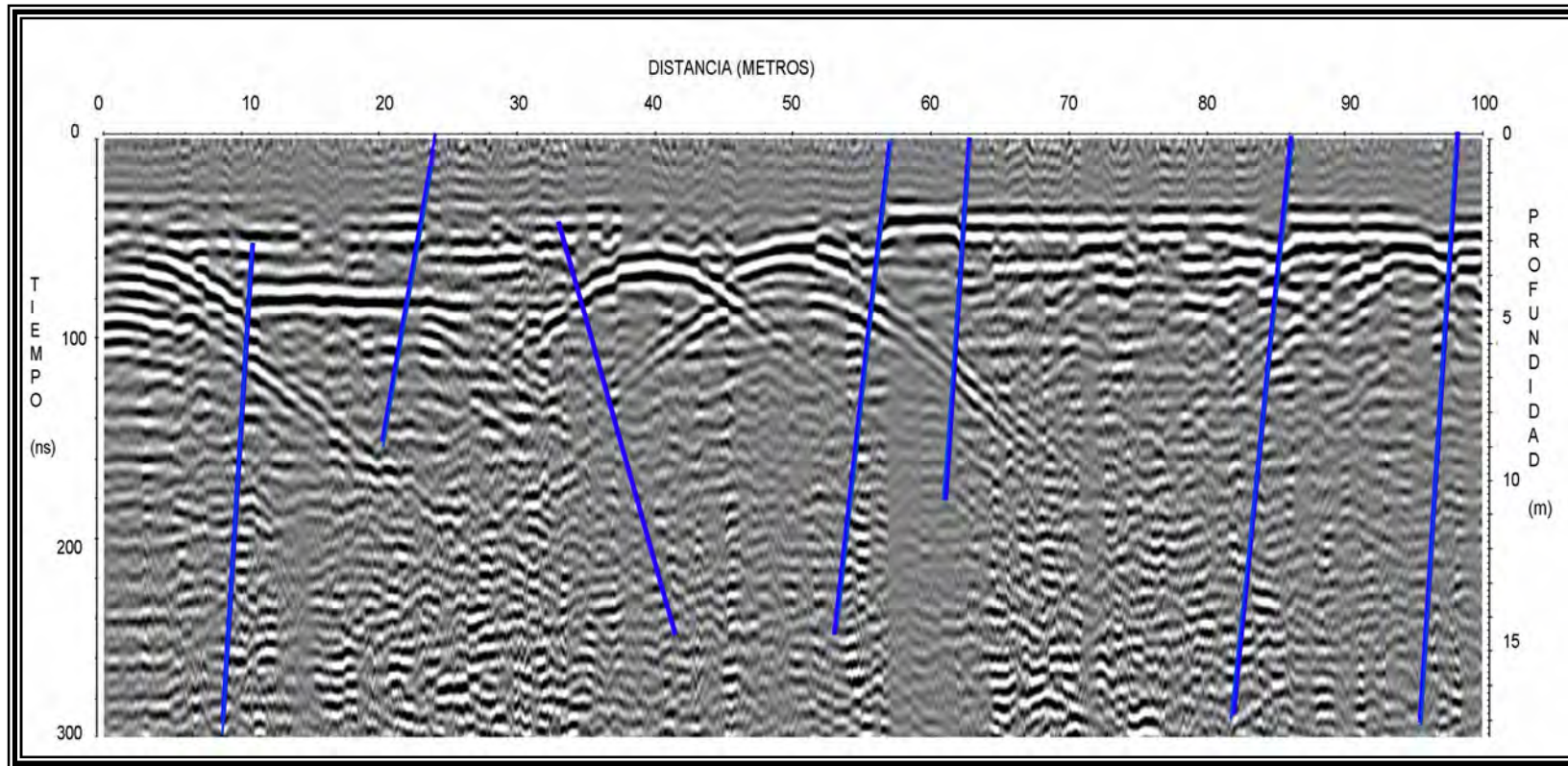


Figura 6.14. Radargrama JM24, obtenido en la calle Misantla con una antena de 70 MHz

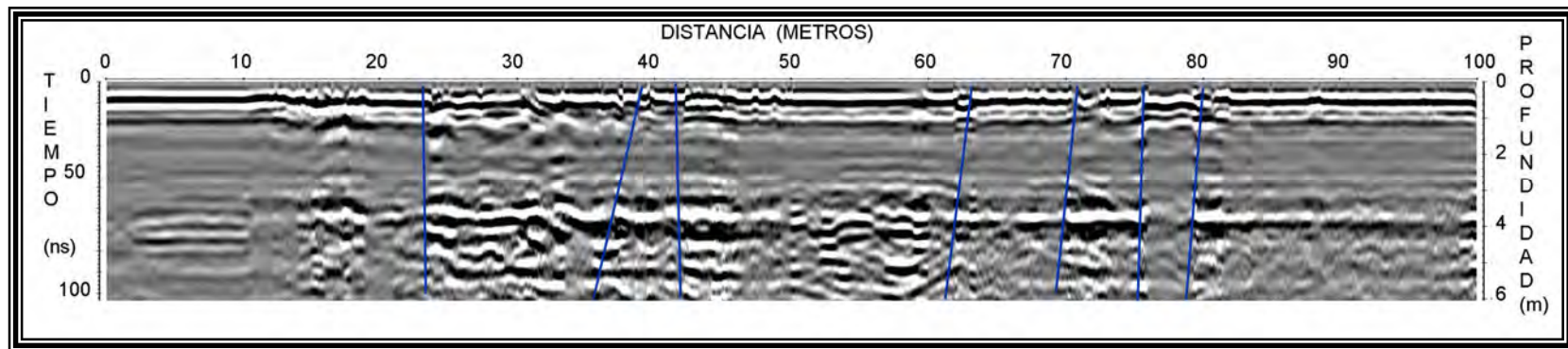
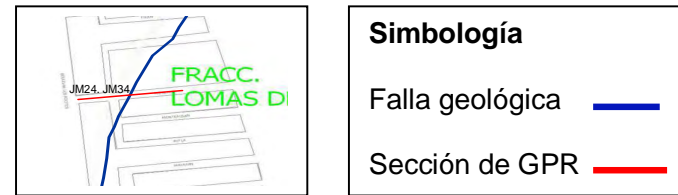


Figura 15. Radargrama JM34, obtenido en la calle Misantla con una antena de 200 MHz



### **e) Calle Bonampank**

Las secciones JM28 y MJ38, fueron adquiridas en la calle Bonampank (Figura 6.12). En esta calle se observan estructuras civiles dañadas, tales como casas, banquetas y el pavimento (Figura 6.16). En ambas secciones se observan principalmente fallamiento en la parte más somera los radargramas, tanto el adquirido con la antena de 70 MHz, como el adquirido con la antena de 200 MHz. En la figura 6.17, observamos en el radargrama una estratificación continua, pero a una distancia de 33 y 40 metros, se observan discontinuidades que evidencian un fallamiento del subsuelo. Entre los 60 y 80 metros de igual forma se observa otras dos fallas (líneas azules). En el caso de la sección JM38 (Figura 6.18) que corresponde a la antena de 200 MHz, se muestra con líneas de color azules las fallas superficiales en los primeros 90 ns.

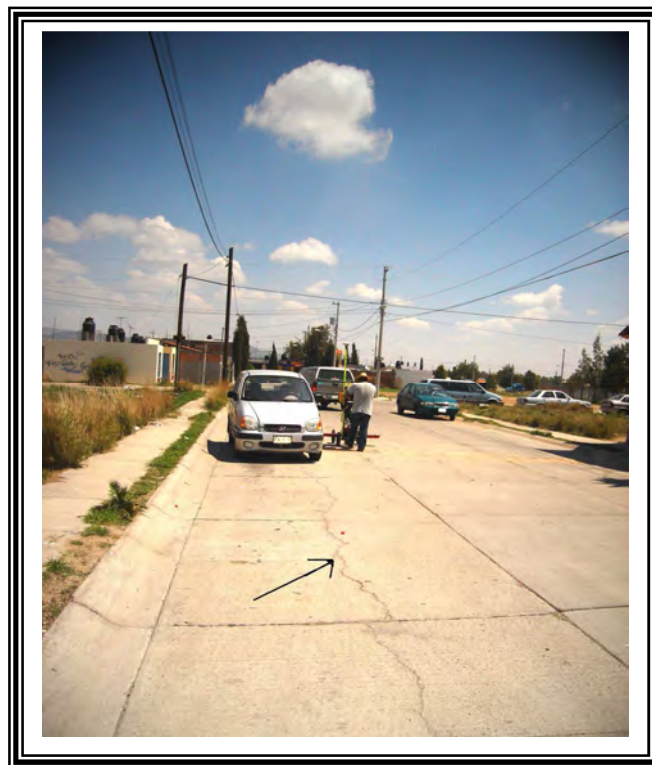


Figura 6.16. Estructuras civiles afectadas por la falla en la calle Bonampank



**Simbología**

Falla geológica ————

Seccion de GPR ————

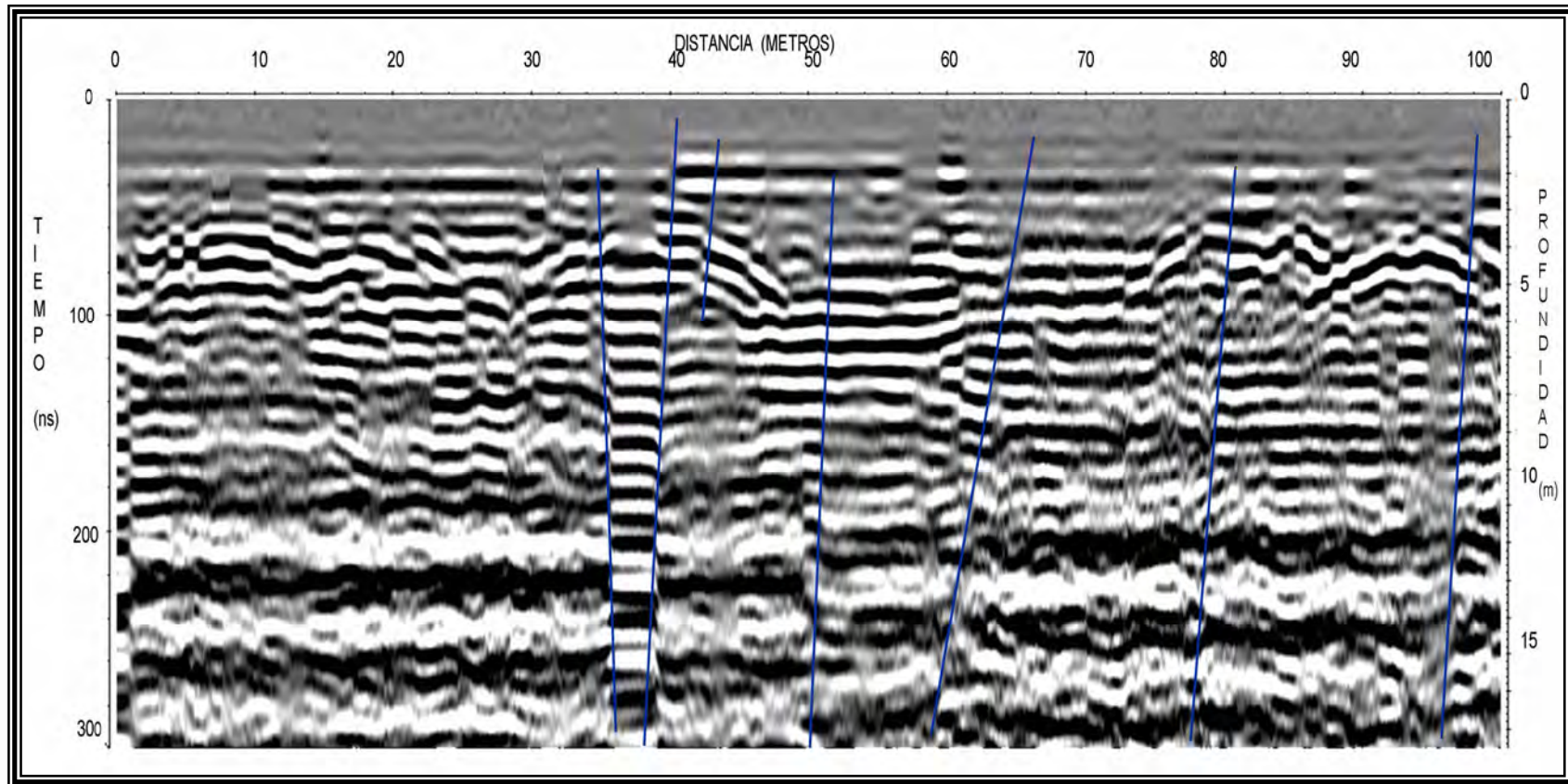


Figura 6.17. Radargrama JM28, obtenido en la calle Bonampank con una antena de 70 MHz.

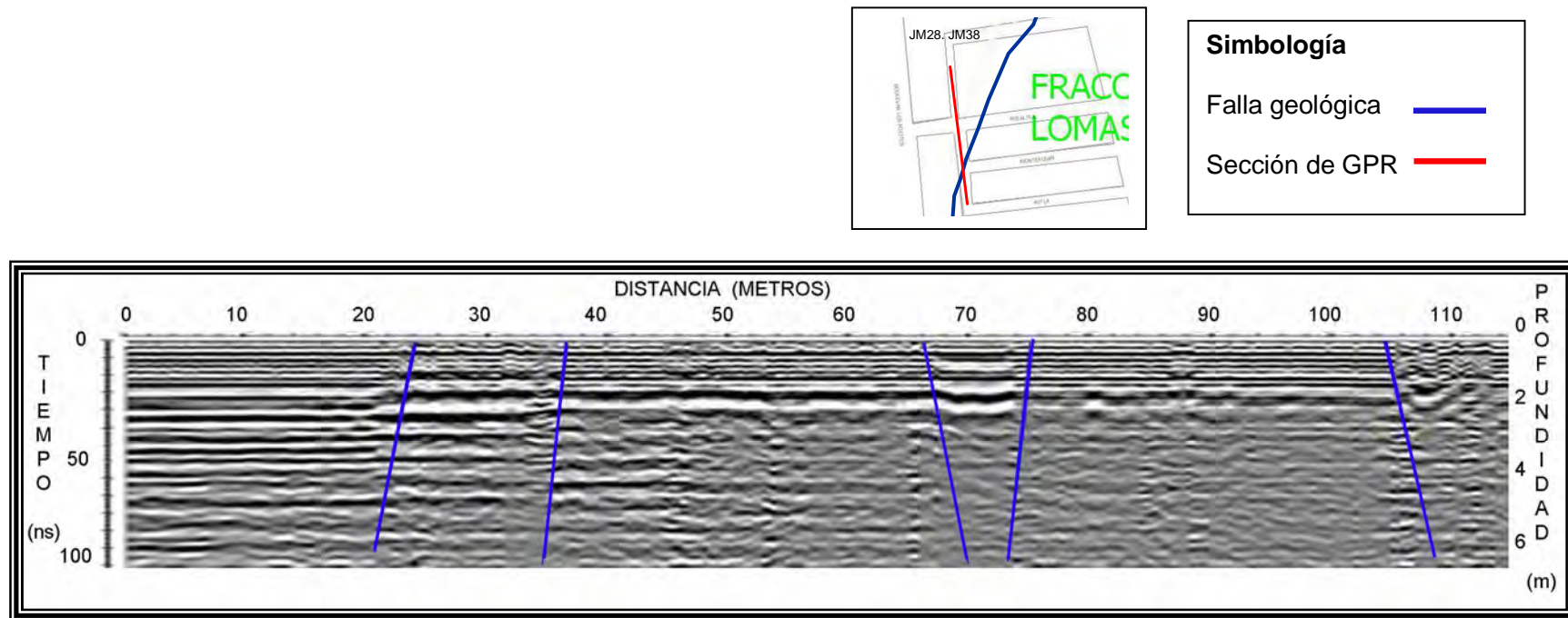


Figura 6.18. Radargrama JM38, obtenido en la calle Bonampank con una antena de 200 MHz.

#### **VI. 1.1.4 Fraccionamiento Vista del Sauz**

En el Fraccionamiento Vista del Sauz se adquirieron los perfiles de GPR en las calles Olmo-Almendro y Olivo-Abedul con antenas de 70 y 200 MHz como se muestra en la figura 6.19.

##### **f) Calle Olmo - Almendró**

En estas calles en particular, las estructuras civiles como son casas y banquetas, se encuentran seriamente dañadas, manifestándose superficialmente en un intenso agrietamiento y dislocación del suelo, calles y demás construcciones, provocando ruptura en el pavimento, que posteriormente tuvo que ser sustituido por nuevo (Figura 6.19 y 6.20).

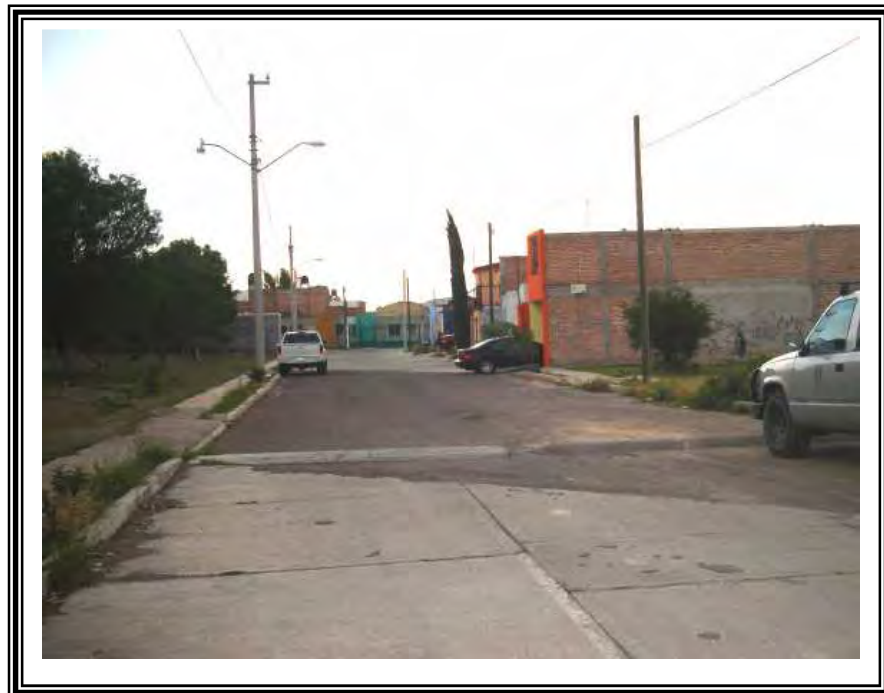


Figura 6.19. Banqueta de la calle Olmo que ha sido afectada por la falla.

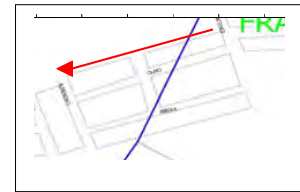
En la figura 6.21, observamos entre los 8 y 100 metros fallas (líneas azules) con una profundidad entre los 300 ns, que se asocian a los daños en el pavimento y banquetas de dicha calle, además dos desplazamientos de superficie (líneas azules), asociadas a posibles fallas.

Con la antena de 200 MHz (Figura 6.22), observamos entre los 18 y 46 metros deformación evidente en la estratificación, las líneas azules parece representar la falla de afectación en los estratos (Olmo y Almendro).



Figura 6.20. Remachadora de pavimento en la calle Olmo, con un largo de cuatro metros de afectación.

### VI. 1.1.4 Fraccionamiento Vista del Sauz



**Simbología**

Falla geológica ———

Sección de GPR ———

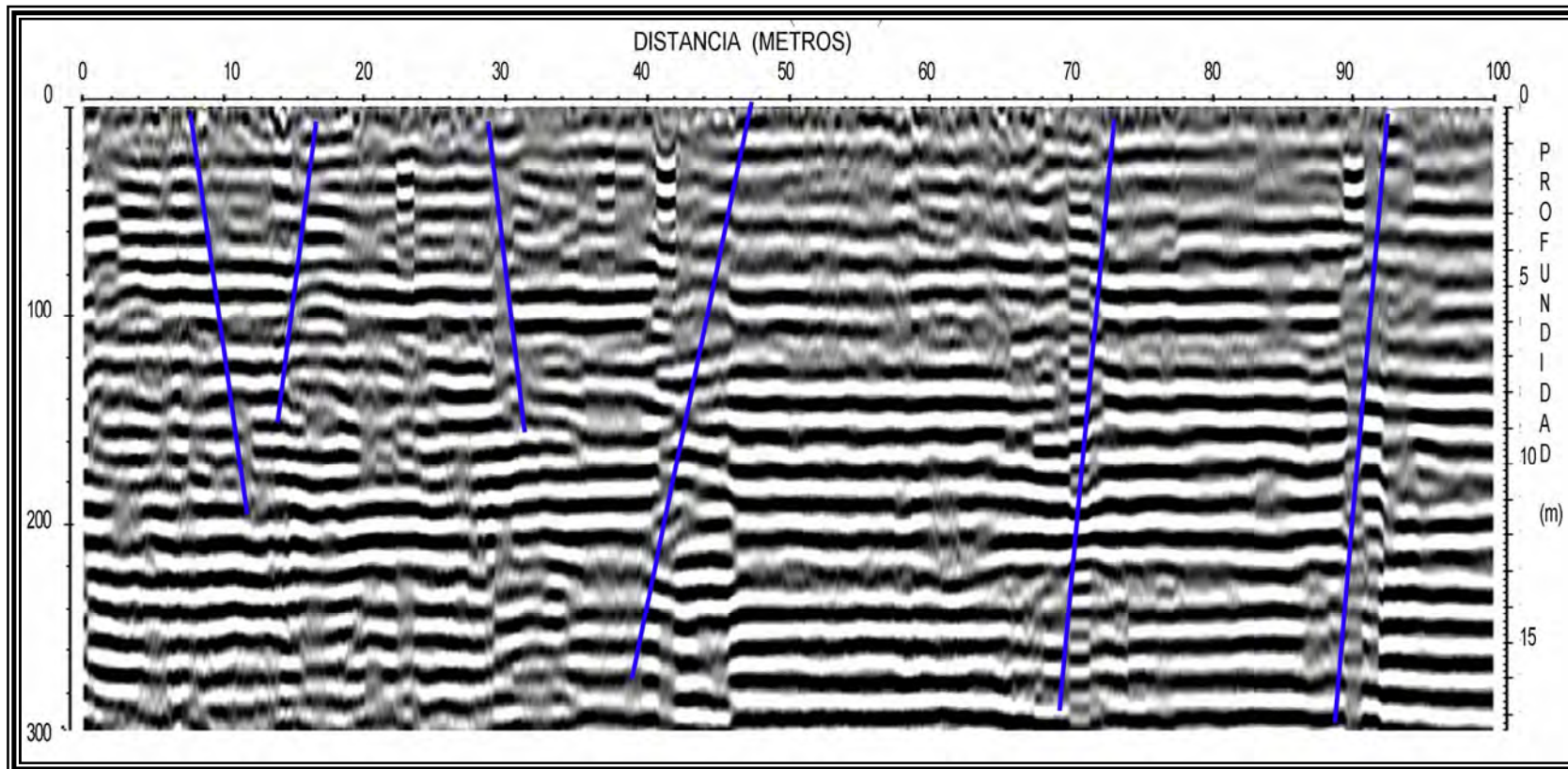


Figura 6.21. Radargrama JM61, Olmo - Almendró con una antena de 70 MHz

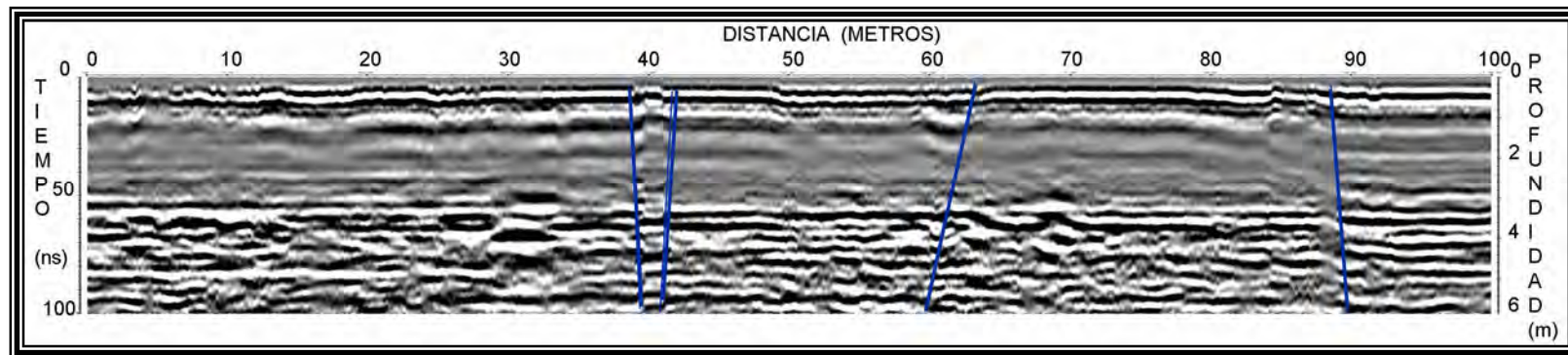
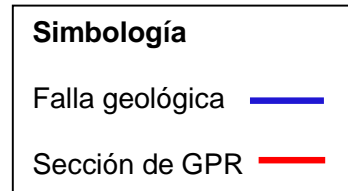
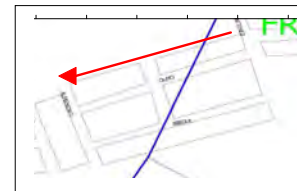


Figura 6.22. Radargrama JM63, Olmo - Almendró con una antena de 200 MHz

**g) Calle Abedul - Olivo**

La sección JM62 y JM64 muestra las secciones GPR de 70 y 200 MHz, levantados a lo largo de las calles Abedul \_ Olivo, así como su interpretación estructural. Con la antena de 70 MHz (Figura 6.24). Se puede observar la presencia de fallas con un buzamiento norte- sur, las cuales afectan desde los reflectores más profundos hasta los más someros. Por su parte, figura 6.25 muestra la sección de 200 MHz. En esta sección, se pueden observar deformaciones frágiles del suelo, se aprecia las fallas (líneas azules) a los 15 ns. Esta falla, ha afectado seriamente a la zona habitacional, más de una casa han sido desalojadas por los daños a las estructuras (Figura 6.23).

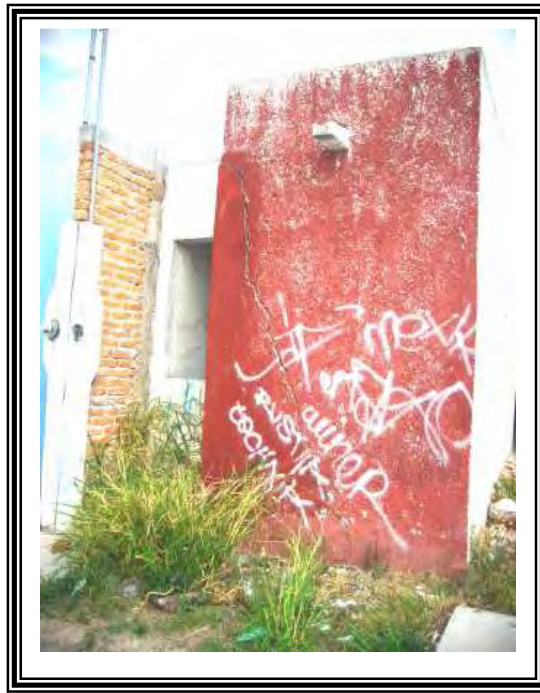


Figura 6.23. Residencia habitacional afectada y abandonada por los daños a la estructura civil





**Simbología**

Falla geológica ————

Seccion de GPR ————

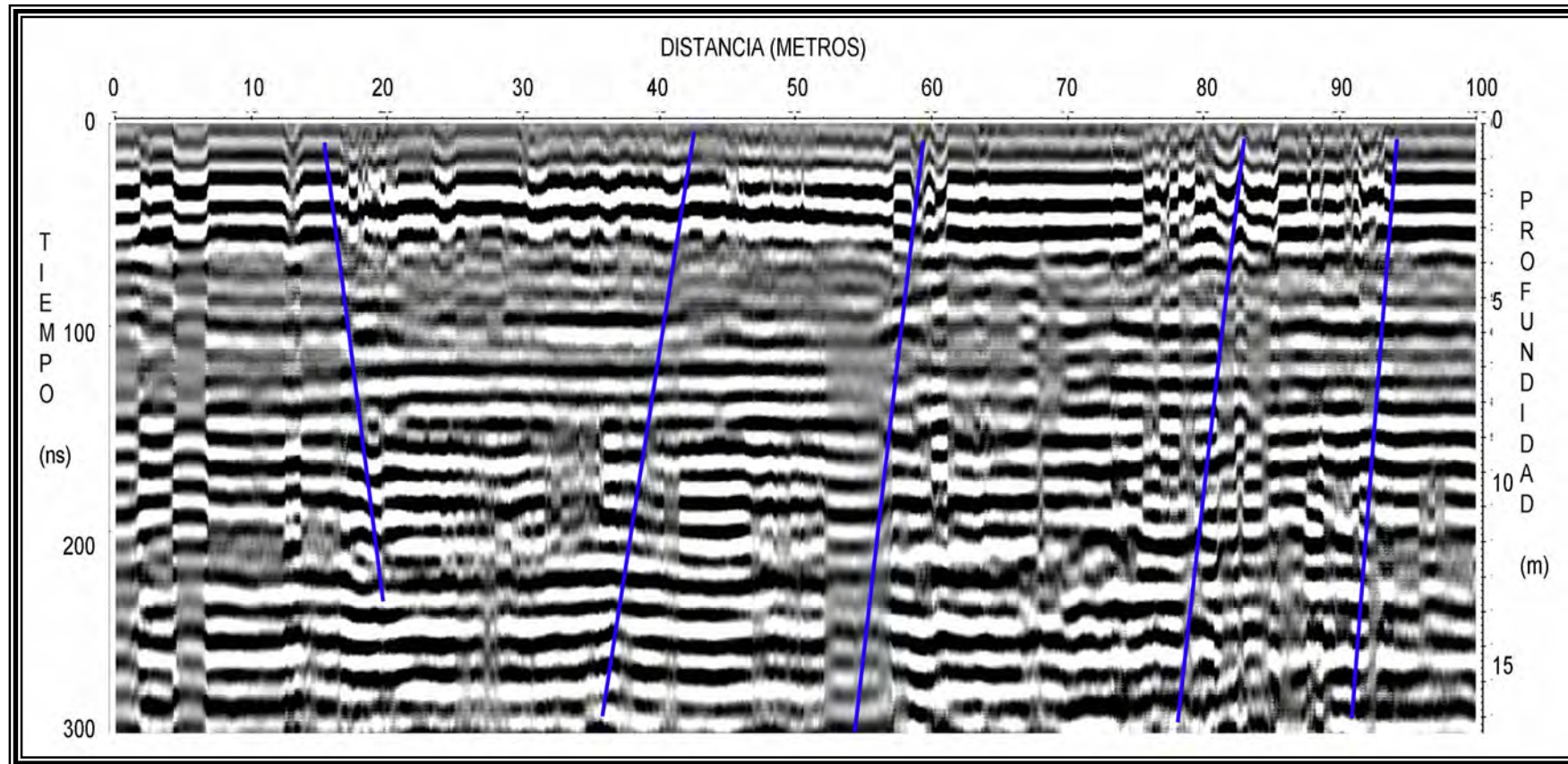


Figura 6.24. Líneas azules fallas someras

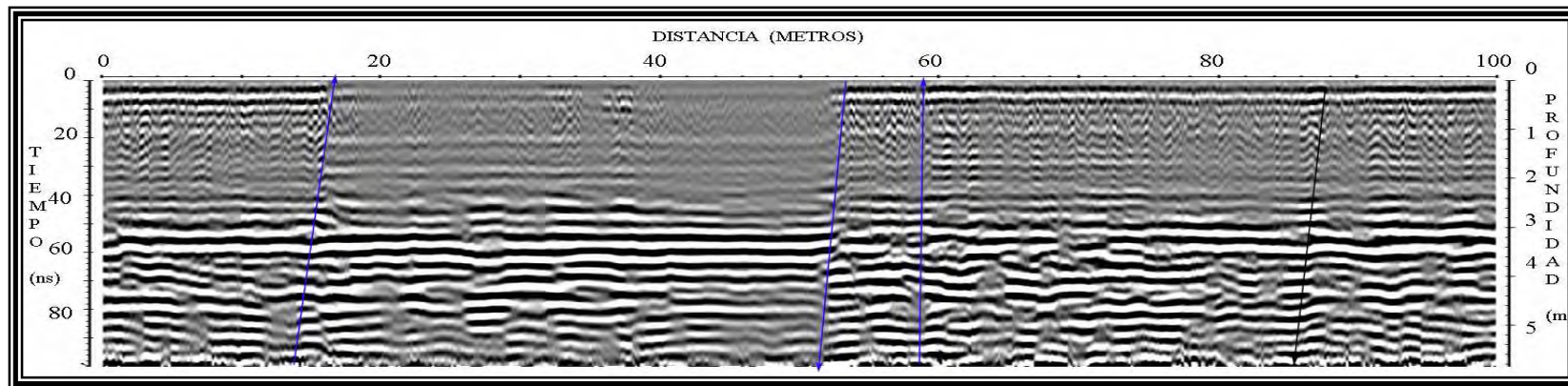
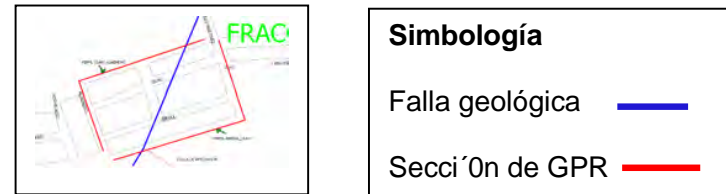


Figura 6.25. Interpretación estructural del radargrama adquirido sobre la calle Abedul-Olivo

### VI. 1.1.5 Colonia La Loma

En la colonia La Loma se adquirieron las secciones JM51 y JM59 con antenas de 70 y 200 MHz (Figura 6.26).

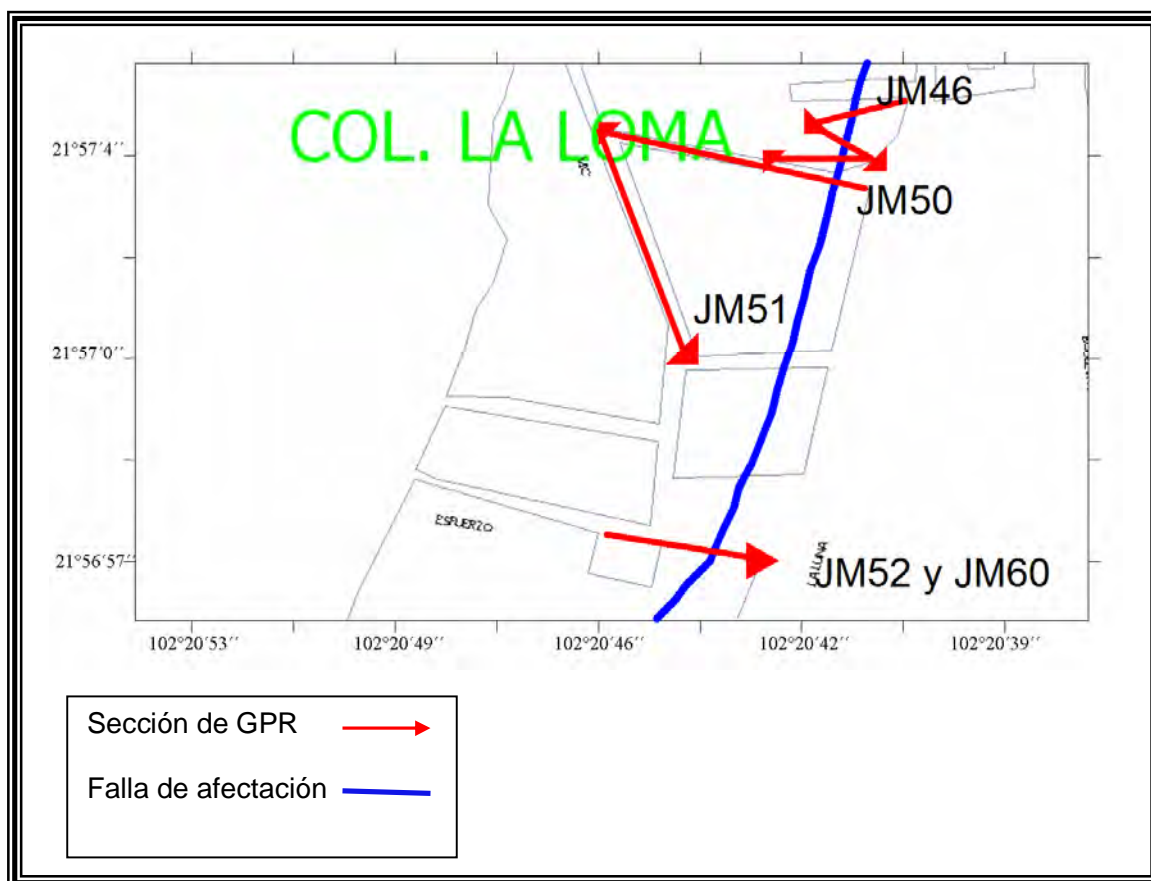


Figura 6.26. Mapa de localización de las secciones adquiridas en la colonia la Loma

### h) Calle Victoria

La sección JM51 (Figura 6.27) de GPR, muestran reflexiones entre los 3 y 8 m de profundidad y entre los 40 y 50 m, se observa la falla de afectación a los 41 metros de distancia, las líneas azules indican las fallas en la superficie, así deformación en los estratos.

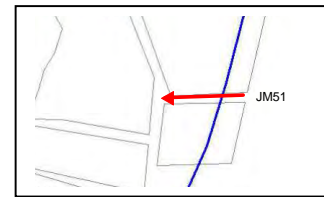
En el radargrama JM59 (Figura 6.28) se destacan en todo el radargrama fuertes reflexiones alrededor de las fallas (líneas azules)

### **i) Calle Esfuerzo**

En la sección JM52 (Figura 6.29) se muestra que las discontinuidades en los reflectores identificadas en los radargramas corresponden muy claramente con las estructuras de fallas. La geometría de las fallas es bien definida en las secciones, estas características las observamos entre los 40 y 50 m de distancia.

Con la antena de 200 MHz se pueden observar este mismo sistema de fallas con la misma angularidad y dirección que en la figura 6.29; es importante destacar que las estructuras antes descritas, son observadas en los radargramas directamente en campo, sin necesidad de mayor procesamiento de los datos.

### VI. 1.1.5 Colonia La Loma



**Simbología**

Falla geológica ————

Sección de GPR ————

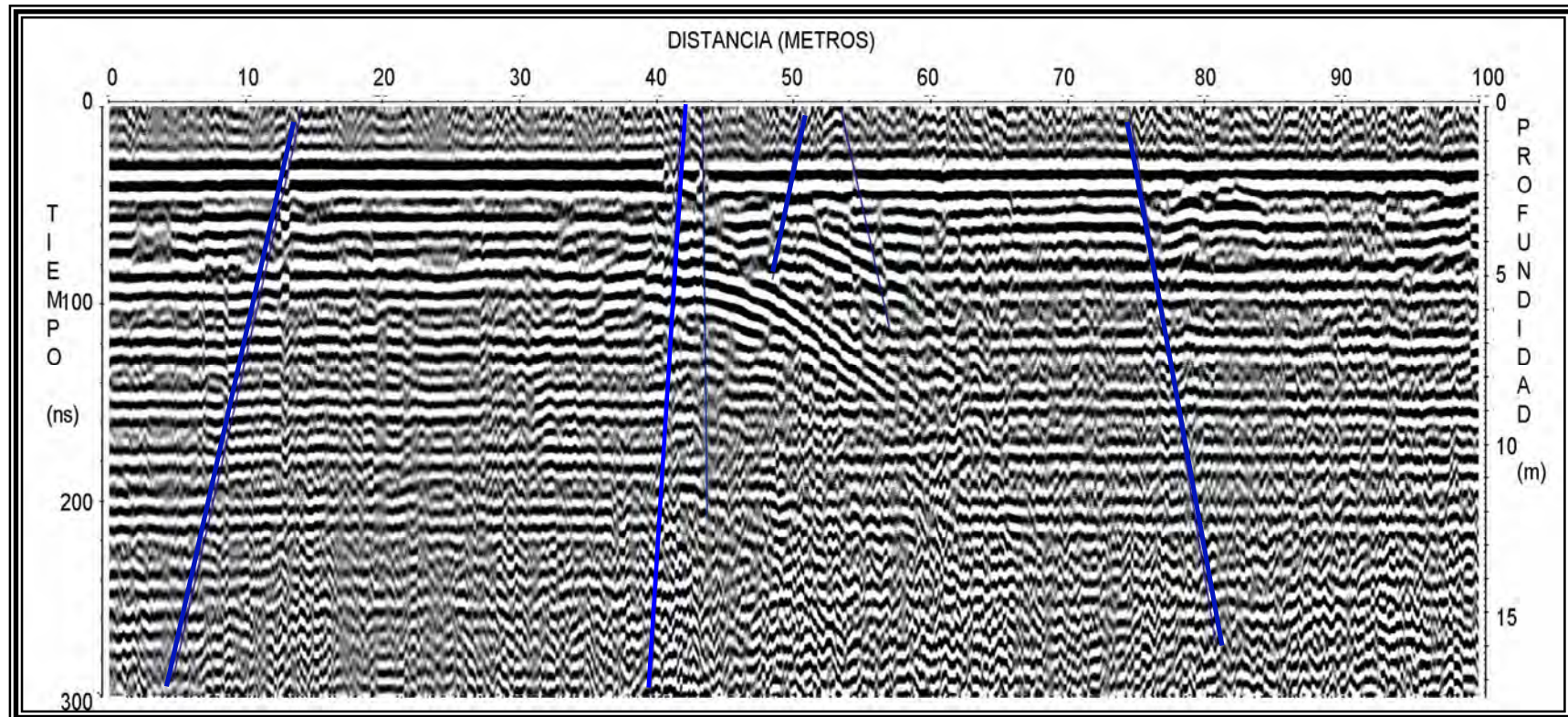


Figura 6.27 Sección JM51, obtenida en la calle Victoria con una antena 70 MHz.

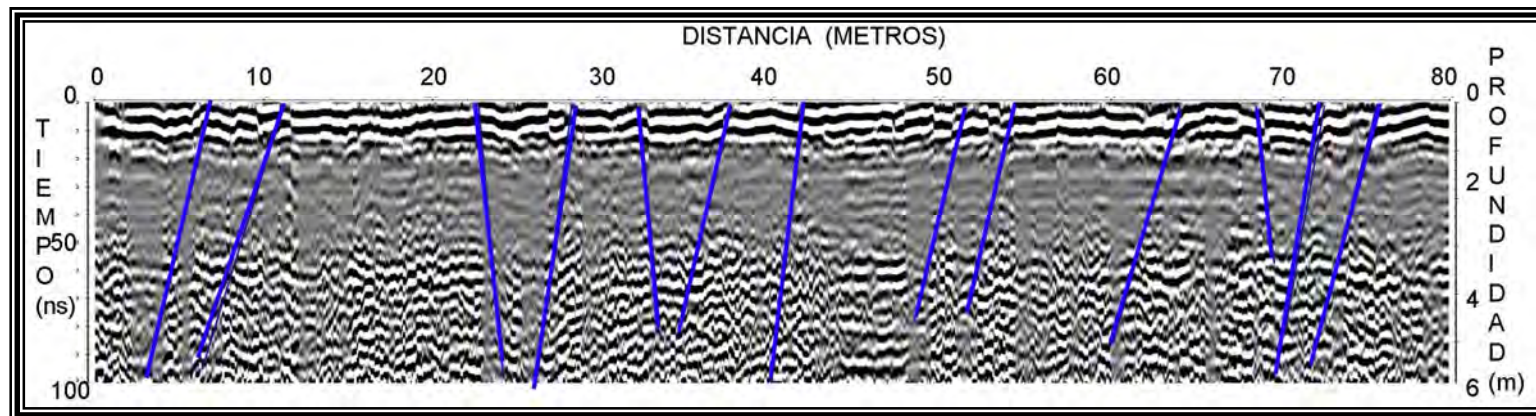
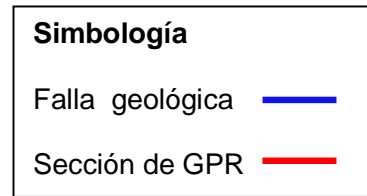
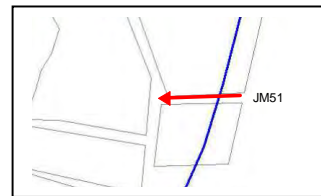


Figura 6.28. Sección JM59, obtenida con la antena de 200 MHz, en la calle Victoria

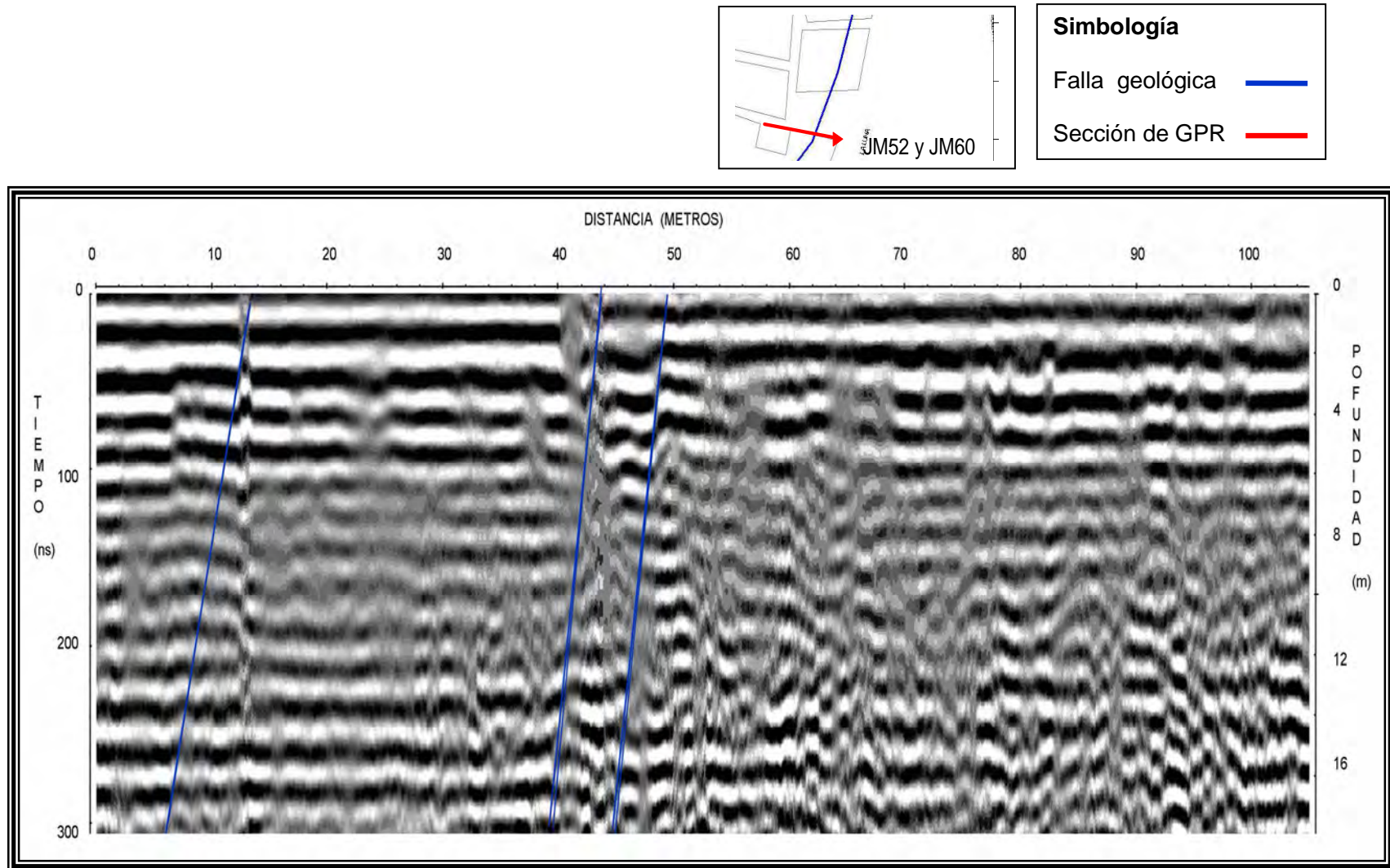
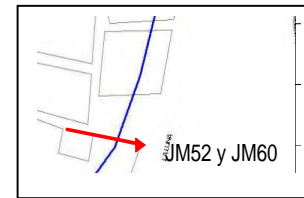


Figura 6.29. Sección JM52 en la calle Esfuerzo



**Simbología**

Falla geológica ————

Sección de GPR ————

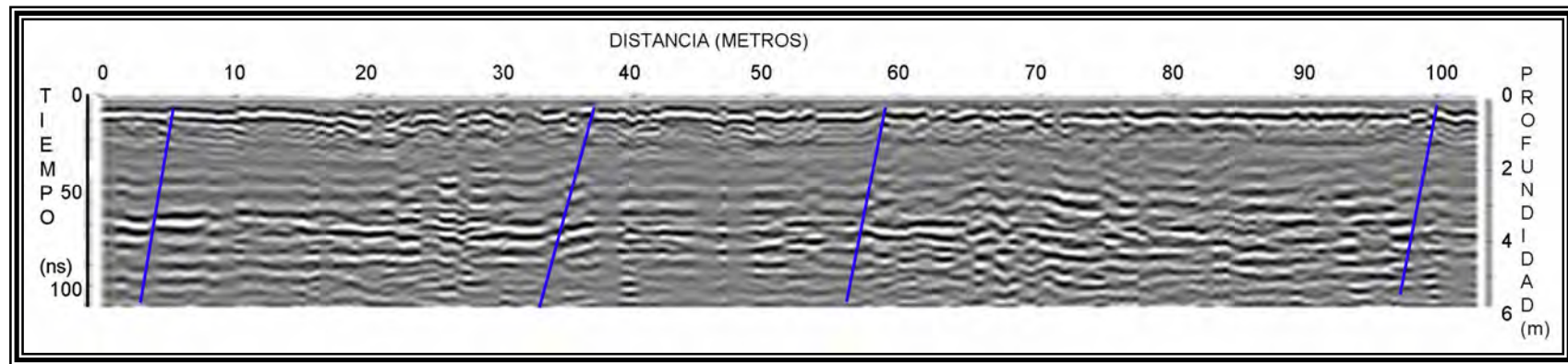


Figura 6.30. Sección JM60 en la calle Esfuerzo



## **VI.2 Análisis de Discontinuidades (Fracturamiento Superficial)**

Se realizó un análisis para determinar posibles fracturas geológicas y zonas de debilidad estructural en las estructuras someras del municipio de Jesús María que es afectado por dos enormes fallas denominadas Estadio y Jesús María (SIDIFAG, 2007). Como se mostró anteriormente en el mapa localización figura 6.1, la localidad está compuesta en su mayoría por depósitos cuaternarios de relleno; y en la superficie del suelo se puede destacar el gran fracturamiento, las cuales se detectaron en subsuelo con GPR. La mayoría de las rocas han sido deformadas y fracturadas debido al proceso de subsidencia que sufre el municipio.

En este paso de interpretación de los datos, las secciones fueron convertidos a profundidades de los datos, introduciendo las velocidades promedios que fueron calculadas por el método amplitud de las hipérbolas de difracción; al programa RADAN que permite realizar conversiones de tiempo a profundidad para múltiples trazas. Para explicación detallada de la velocidad promedio utilizada, referirse al capítulo V.

Es importante destacar que algunas de estas posibles fallas fueron reconocidas debido a discontinuidades presentes en las reflexiones y también debido a la dispersión de la energía de la onda, al encontrar estas zonas de fracturas. En este caso, las difracciones han sido removidas utilizando la técnica de migración en el procesamiento de los datos. Por otro lado, es importante destacar que las fallas que afloran en el sitio de estudio, presenta una alta tasa de meteorización o que las fallas presentan pequeñas aperturas hacia la superficie. Es importante destacar que las estructuras antes descritas, son observadas directamente en campo.

En cuanto a las estructuras identificadas en las secciones de GPR, éstas corresponden principalmente a estructuras de alto buzamiento, con alta inclinación (casi verticales) con respecto a la estratificación. En las secciones JM5 y JM64

se puede observar la distribución de dos a tres bandas principales orientadas aproximadamente N-S, a lo largo de las cuales se generan fallas (líneas azules). Así mismo, existen otras bandas de agrietamiento orientadas N45E (Figuras 6.6 y 6.18), que obedecen a un fallamiento geológico que tiene ésta misma dirección.

En las zonas donde el fallamiento tiene alta angularidad con respecto a la estratificación (parte superior izquierda de las Figuras 6.10 y 6.22), se distinguen las deformaciones frágiles existentes, aunque, es de fácil identificación cualquier otra estructura a la estratificación.

La profundidad al igual que la resolución obtenida en las secciones, dependen del tipo litología o composición del suelo en el cual fue adquirido en las secciones. En consecuencia, los pulsos electromagnéticos emanados por el transmisor son atenuados por los cambios de porosidad y de compactación existentes en la roca. No obstante, la penetración obtenida con la antena de 70 MHz es suficientemente buena para realizar una interpretación de los primeros 10 metros del substrato, y así corroborar la existencia o no de deformaciones. El otro perfil que se muestra un fracturamiento, en este caso de menor grado que el discutido anteriormente, es la sección JM52. El perfil, se encuentra localizado en la colonia la Loma. En este caso la intensidad de fracturamiento es alta y dichas fracturas presentan una dirección de buzamiento hacia el Norte. A pesar de que este perfil presenta menor cantidad de fracturas, se puede observar que el fracturamiento aumenta a profundidad.

La ubicación de la zona en que se realizó este trabajo, así como las fracturas encontradas, se muestran en la figura 6.31, se observa una ampliación donde se muestran el mapa de estas fallas interpretadas, diferenciando a que está asociada cada una de ellas.

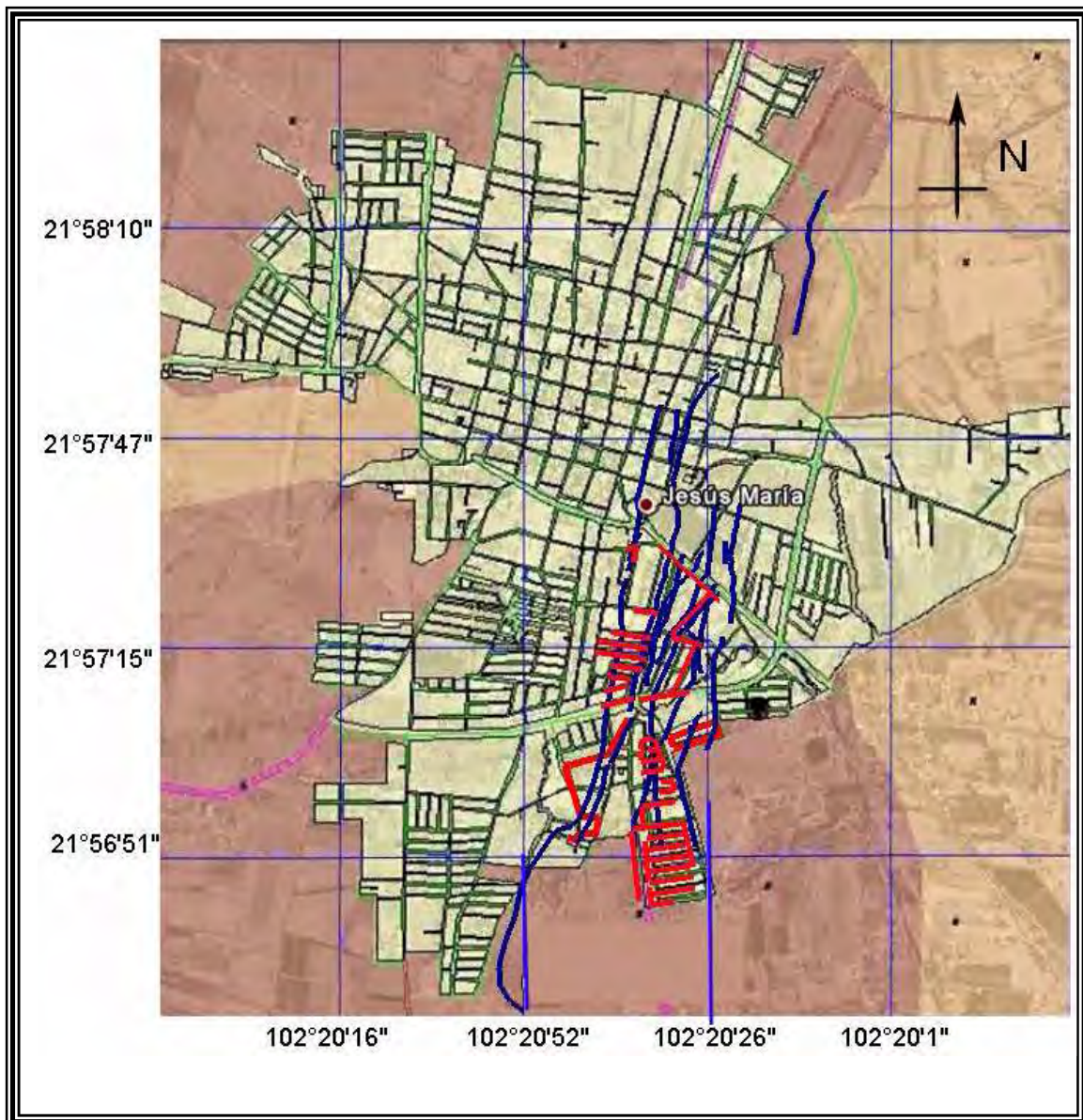


Figura 6.31. Mapa de localización de fallas cartografiadas con el método de GPR.

El problema de fallas en la ciudad de Aguascalientes ha sido estudiado por varios autores, el Sistema Digital de Discontinuidades de la Ciudad de Aguascalientes, tiene como objetivo brindar a la sociedad información sobre el comportamiento de las fallas y grietas geológicas que están presentes en suelo, en el cual se muestran las fallas observadas en el SIDDIS 2007 (Figura 6.32).



Figura 6.32 Mapa de localización de fallas de la zona de estudio del SIDDIS 2007.

Principalmente Secretaría de Obras Públicas Coordinación General de Calidad y Fallas Geológicas, a través del SIDDIS 2007, manejan dos grandes fallas que afectan a la ciudad de Jesús María las denominadas Estadio y Jesús María que son las que afectan al Municipio. El análisis que realizamos en este trabajo con el método de GPR manifiesta la existencia de pequeñas ramificaciones a estas dos grandes fallas que atraviesan todo el municipio como se observa en la figura 6.31. Esto demuestra que el problema de fallamiento y fracturamiento en el suelo de Jesús María es muy rápido al paso del tiempo y las consecuencias a daños a las estructuras civiles del municipio conllevarán un costo muy grande en un corto plazo.

## **CAPÍTULO VII CONCLUSIONES**

Las fracturas en suelos arcillosos causan serios problemas cuando se encuentran en zonas urbanas debido a que afectan a la infraestructura como casas, drenaje, cableado subterráneo, etcétera. El objetivo de este estudio fue aplicar el GPR para localizar y mapear la distribución y continuidad de las fracturas en una zona urbana, donde el GPR es un método viable. El Radar de Penetración Terrestre demostró ser un método geofísico de fácil utilización y permitió la localización y caracterización de fallas someras que afectan la zona en estudio. Esto permitió definir su área de influencia incluyendo aquellas fallas donde no presenta aún una expresión en superficie. Por último, el presente ejercicio demostró que el método de GPR tiene una clara aplicación en el estudio de fallas someras. Además demostró ser un método geofísico, el cual muestra en campo y en tiempo real, las estructuras presentes en una zona en estudio. La aplicación de este método en la zona Metropolitana de Aguascalientes, mostró buena resolución de las estructuras del subsuelo en esta zona urbana, en cuanto a la ubicación y geometría de las fallas, que afectan la zona en estudio, por lo que fue posible realizar sobre los perfiles adquiridos, una interpretación muy similar a la realizada directamente sobre la superficie.

Entre los principales resultados derivados de este proyecto están los siguientes:

Se ubicaron las zonas con mayor susceptibilidad de sufrir agrietamientos en el futuro cercano a partir del mapeo del relieve de estrato compresible y de la localización de una estructura cuya orientación es N45°E.

Los agrietamientos del suelo se producen cuando se satisfacen las siguientes condiciones:

- El basamento rocoso presenta una topografía irregular.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

- Los estratos de suelo muestran compresibilidad media e índices de plasticidad medios o bajos.

Cuando una falla se desarrolla completamente desde la superficie hasta el basamento y el abatimiento del nivel freático continúa, este fenómeno puede evolucionar en fallas no tectónicas que se manifiestan por diferencia de alturas entre los flancos de la grieta. El desarrollo y evolución de estos fallamiento depende del espesor, del factor de compresión y del índice plástico de los estratos. Cuando un fallamiento se desarrolla completamente formando dos bloques separados, la zona original de tensión se reduce de tamaño apareciendo una nueva distribución de las tensiones. Esto permite predecir la localización de nuevos agrietamientos lo cual resulta sumamente útil para la planeación urbana. Existe una gran complejidad estructural en el subsuelo donde éste se ubica. Se detectó una zona de debilidad estructural cuya orientación es N45°E, la cual es consistente con la tendencia de una estructura regional con la misma dirección, observada ésta última a partir de los estudios geológico y geofísico del valle.

Es importante destacar que las fallas observadas en los perfiles, corresponden a un grupo de fallas paralelas entre sí, de alto ángulo con respecto a la estratificación y con alto buzamiento en su mayoría dirección N-S. Muchas fracturas acompañadas principalmente con el desplazamiento normal se han detectado. La mayor intensidad de fracturas y fallas se encuentran concentrados en un área de unos 100 metros en torno a la zona de fallas.

En los radagramas muestra de forma claramente visible información sobre la distribución de fallas y defectos internos de la superficie. La parte inferior mas densa del radargrama corresponde al suelo o pavimento, donde se puede observar información sobre las fallas contenidas en él. En el radargrama se muestra por donde continuaba la grieta que se observa en fotografía marcada por una flecha. Las fallas son activas porque muestran desplazamiento rupturas en las estructuras civiles en el área de estudio.

## CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

La caracterización de fallas sugirió que la mayoría de las zonas fracturadas están asociadas con una litología. Por último, se determinó que la zona que presentó características de fallamiento intenso corresponde a profundidades entre los 1 y 10 metros. La estructura general que presentaron las capas someras presenta buzamientos en dirección .N-S. Existe una gran complejidad estructural en el subsuelo donde éste se ubica. Se detectó una zona de debilidad estructural cuya orientación es N45E, la cual es consistente con la tendencia de una estructura regional con la misma dirección.

## BIBLIOGRAFÍA

Álvarez R (2005), *Caracterización de procesos de subsidencia creep-falla en sedimentos lacustre por medio del Radar de Penetración Terrestre (GPR)*, UNAM, Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Vol. 13, No. 3, pp. 205-211.

Aranda-Gómez José (1986), *Análisis del agrietamiento en la ciudad de Aguascalientes: Aguascalientes, Univ. Antón. Aguascalientes, informe interno*, pp. 104.

Aranda-Gómez José (1989), *Geología Preliminar del Graven de Aguascalientes*, UNAM, Inst. de Geología, Revista, Vol. 8, No. 1 pp. 22-32.

Aranda-Gómez José (1991), *Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la Mesa Central*, UNAM, Inst. de Geología, Revista, Vol. 8, No. 5 pp. 33-46

Arroyo Contreras, Guadalupe Moisés, (2003), *Causas y efectos de grietas y fallas en el Valle de Aguascalientes*, SIHGO

Benson Alvin K (1993) *Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities*, Journal of Applied Geophysics Brigham Young Universit, ,pp. 177-193.

Burger, H. Robert, (2006), *Introduction to Applied Geophysics: Exploring the shallow subsurface*, Ed. Norton, México, pp. 424-451.

CNA (Comisión Nacional del Agua, 2005), *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Aguascalientes, Estado de Aguascalientes*



Casper David, K-J. Samuel Kung (1996);, *Simulation of ground-penetrating radar waves in a 2-D soil model*, Geophysics, Vol. 61, No. 4, pp. 1034-1049.

Fisher Elizabeth, McMechan George A (1992);, *Acquisition and processing of wide-aperture ground-penetrating radar data*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 57, No. 3, pp. 495-504.

Geophysics Survey System (1995), *RADAN For Windows*, GSSI, Estados Unidos de Norteamérica.

González, Luis, (2002), Ingeniería Geológica Aplicada Civil, PRETINCE-hall, pp. 608-613.

González Treviño. Guillermo (2003), Estudios urbanísticos y ambientales en el Cd de Aguascalientes, SEDESOL.

Harari, Zaki (1996), *Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 36, No. 1, p. 43-52.

Jeffrey J. Daniels (2000), *Ground Penetrating Radar Fundamentals*, The Ohio State University, Department of Geological Sciences, pp. 1-21.

K. Viriyametanonta, (2007) *Radar survey of concrete elements: Effect of concrete properties on propagation velocity and time zero*, NDT&E International, Paul Sabatier University, pp.198–207.

Kutrubes, Doria L. (1994), *Determination of GPR processing capabilities using ProMAX*, Proceedings of the IEEE Dual-Use Technologies & Applications Conference, V. II, pp. 439-446.

Martínez Reyes Juventino, Arzate Flores Jorge, Psevolod Yutxis, Luis M. Mitre Salazar y Moisés G. Arroyo Contreras (2004), *Geología del graben de Aguascalientes. estratigrafía y estructura del entorno de la ciudad de Aguascalientes*, México UNICIT, UNAM, Campus Juriquilla

Mitre S. Luis, Martínez R., Juventino, (2003), *Aportación de la cartografía geológica del valle de Aguascalientes para la reevaluación del agua subterránea*, UNAM, Centro de Geociencias, Vol. 23, No. 2, pp. 93-102

Mitre S. Luis, Martínez R., Juventino, (2003), *Agotamiento de acuíferos y subsidencia de terrenos en el valle de Aguascalientes. marco estratigráfico y estructural* UNAM, Centro de Geociencias, Vol. 23, No. 2, pp. 93-102

Montellano B. Marisol (1980), *Una edad del irvingtoniano al rancholabreano para la fauna del cedazo del Estado de Aguascalientes*, UNAM, Inst. de Geología, Revista, Vol. 8, No. 2 pp. 195-203

Moorses Oswaldo (1980), *Pleistocene fossil turtles from, Aguascalientes, State of Aguascalientes* UNAM, Inst. de Geología, Revista, Vol. 4, No. 1 pp. 60-66.

Nieto-Samaniego A, Alaniz-Álvarez S. (2005), *La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica*, BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA, TOMO LVII, N. 3, pp. 285-318.

Orellana, Ernesto (1974), *Prospección geoelectrica por campos variables*, Editorial PARAINFO, Madrid.

SGM (Servicio Geológico Mexicano, 2006), *Panorama Minero del Estado de Aguascalientes*.

Sótelo Rodríguez Arturo (2004) *Análisis del fracturamiento reciente en el valle de Aguascalientes*, GEOS, Vol. 24, No. 2, pp. 183-193.

Waxman, M.H. and Smits, L.J.M., 1968, "Electrical conduction in oil-bearing sands," Society of Petroleum Engineers Journal, 8, 107-122.

Yilmaz Ozdogan (1987), *Seismic data processing*, Society of Exploration Geophysics, Tulsa. pp 234-310.

Paginas web.

[http://www.e\\_local.gob.mx/work/templates/enciclo/aguascalientes/municipios/01005a.htm](http://www.e_local.gob.mx/work/templates/enciclo/aguascalientes/municipios/01005a.htm).

<http://www.inegi.gob.mx/inegi/default.aspx>.