



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA
CONSTRUCCIÓN**

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS

TESIS

**CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN MEDIO AMBIENTE
INFRAESTRUCTURA-SUBSIDENCIA EN JESÚS MARÍA AGS.**

PRESENTA

Fernando Acuña Lara

**PARA OBTENER EL GRADO MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL CON
ESPECIALIDAD AMBIENTAL**

TUTOR

Dr. Jesús Pacheco Martínez

COTUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

COMITE TUTORAL

M.C. Norma Gonzalez Cervantes

M.C. William Herbe Herrera León

Aguascalientes, Ags., 14 de septiembre de 2018



Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

Oficio: CCDC-D-362-2018
Asunto: Conclusión de tesis

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

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "CARACTERIZACIÓN DE LA INTERACCIÓN MEDIO AMBIENTE-INFRAESTRUCTURA-SUBSIDENCIA EN JESÚS MARÍA, AGS.". Presentado por el sustentante: Fernando Acuña Lara con ID: 219268, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

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

ATENTAMENTE
Aguascalientes, Ags., 12 de septiembre de 2018
"SE LUMEN PROFERRE"

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

- c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
- c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
- c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Tutor de tesis.
- ~~c.c.p.- Arq. Fernando Acuña Lara – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.~~
- c.c.p.- Lic. Della Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
- c.c.p.- Archivo

OVG/tbv





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

M. EN FIL. OMAR VAZQUEZ GLORIA
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCION
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **FERNANDO ACUÑA LARA** con ID 219268 quien realizó tesis titulado: **CARACTERIZACION DE LA INTERACCION MEDIO AMBIENTE INFRAESTRUCTURA-SUBSIDENCIA EN JESUS MARIA AGS.** y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *ella* pueda proceder a imprimir la, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

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

ATENTAMENTE
"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 07 de Agosto de 2018.

Dr. Jesus Pacheco Martinez
Tutor de tesis

Dr. Martin Hernández Marín
Asesor de tesis

M. William Herbe de León
Asesor de tesis

- ✓ c.c.p.- Fernando Acuña Lara
- c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León - Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez - Jefatura del Depto. De construcción
- c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario – técnico de la Maestría
- c.c.p.- Archivo

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN 8

ABSTRACT 9

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN..... 9

 1.1 Objetivo General 9

 1.2 Objetivos Particulares 9

 1.3 Alcances 10

 1.4 Justificación..... 11

 1.5 Hipótesis..... 12

 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS FALLAS Y FRACTURAS ASOCIADAS A
 SUBSIDENCIA..... 15

CAPITULO III: MARCO TEORICO 19

 PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL SUELO. 19

CAPITULO IV: METODOLOGIA 32

 METODO GEOFISICO PARA CARACTERIZAR LA INFILTRACION. 34

 PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DE RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y
 GRAVIMÉTRICAS..... 35

 ANALISIS GRANULOMETRICO POR MALLAS S.U.C.S. 36

 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA BOX-SOIL. 36

CAPITULO V: RESULTADOS..... 39

 MEDICIONES GEOFISICAS..... 39

 RESULTADOS DE RESISITIVIDAD EN LABORATORIO MEDIANTE LA BOX-SOIL 50

 RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS 53

CAPITULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS..... 56

 MEDICIONES GEOFISICAS..... 56

 RESULTADOS DE LA PRUEBA BOX-SOIL..... 58

 RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS 58

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS. 60

 CONCLUSIONES PARTICULARES 61

 NICHOS DE INVESTIGACION 64

BIBLIOGRAFÍA..... 65

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Valores típicos de resistividad de suelos de acuerdo a su tamaño. Tabla tomada y modificada de Perez-Garcia et al. (2010). Se agregan a esta tabla los valores medidos de agua residual de muestras tomadas de la zona de estudio.....20

Tabla 5.1.- muestra los resultados de las resistividades calculadas para cada muestra..50

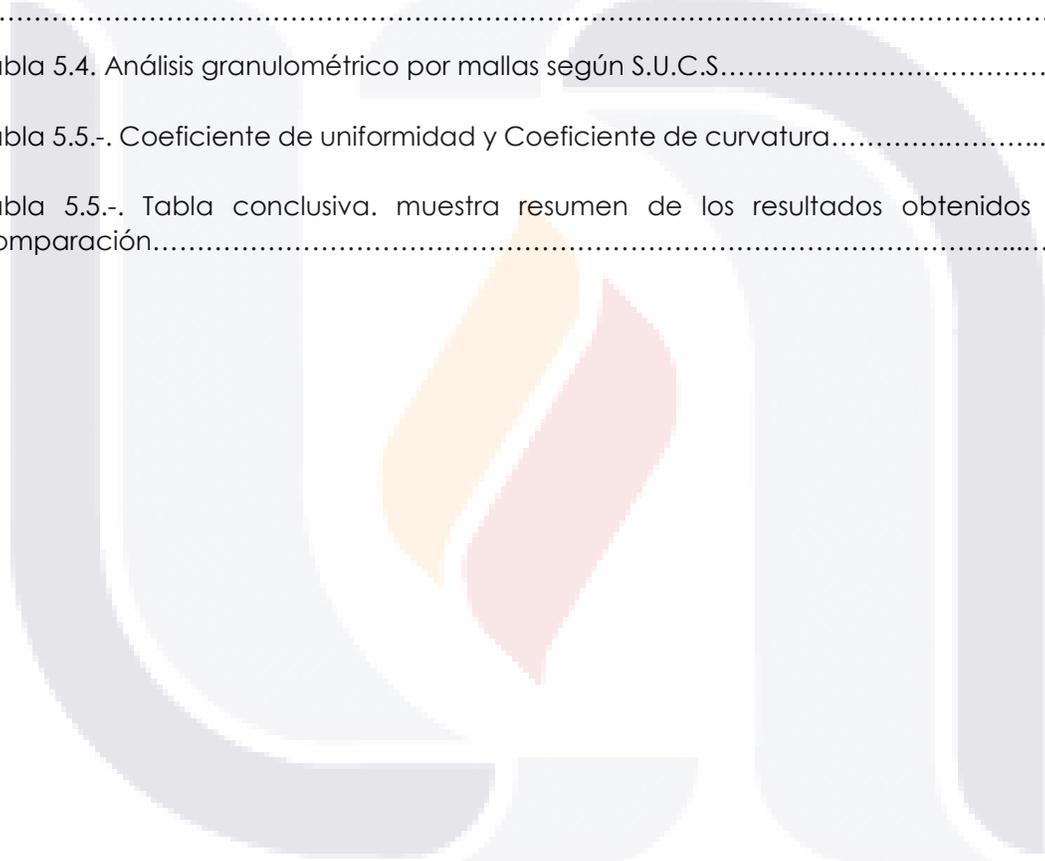
Tabla 5.2.- muestra los resultados de las resistividades calculadas para muestras con 100ml52

Tabla 5.3.- muestra los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio para el sitio 1.....53

Tabla 5.4. Análisis granulométrico por mallas según S.U.C.S.....53

Tabla 5.5.-. Coeficiente de uniformidad y Coeficiente de curvatura.....53

Tabla 5.5.-. Tabla conclusiva. muestra resumen de los resultados obtenidos y su comparación.....62



INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Muestra sitio de estudio 1 y problemática en Chicachuales Jesús María.....9

Figura 2.1.- Se muestra la región conocida como Bajío mexicano..... 12

Figura 2.2- esquema de efectos derivados del fenómeno de subsidencia modificado de *Hasanuddin et al.* 2015.....14

Figura 3.1.- muestra el espacio libre siendo ocupado por aguas residuales.....17

Figura 3.2.- esquema de funcionamiento box-soil para determinar resistividad en laboratorio.....18

Figura 3.3.- esquema de medición en subsuelo con tomografía eléctrica resistiva.....23

Figura 4.1.- lugares seleccionados para mediciones geofísicas y para levantar muestras de laboratorio las cuales se encuentran en la trayectoria de las líneas rojas que representan el sistema de fallas y grietas en una porción del valle de Aguascalientes.....29

Figura 4.2.- Resistímetro levantando datos de campo.....30

Figura 4.3.- esquema de funcionamiento resistividad eléctrica.....31

Figura 4.4.- fases que componen una muestra de suelo (Tomado y modificado de *(García-Cortés and Rodríguez 2006)*).....33

Figura 4.5.- prueba de box.....34

Figura 5.1.- muestra los 5 puntos de mediciones geofísicas.....36

Figura 5.2. Localización de TER_01.37

Figura 5.3 TER_01.....37

Figura 5.4. Localización de TER_02.....40

Figura 5.5 TER_02.....40

Figura 5.6. Localización de TER_03.....41

Figura 5.7 TER_03.....42

Figura 5.8. Localización de TER_04.....43

Figura 5.9 TER_04.....43

Figura 5.10. Localización de TER_05.....45

Figura 5.11 TER_05.....45

Figura 5.12.- Ubicación de extracción de la muestra en el perfil correspondiente al sitio 1.....48

Figura 6.1.- Comparación entre puntos con infiltración y sin infiltración.....56

Figura 7.1.- metodología propuesta para determinar daños al medio ambiente.....70

RESUMEN

En la presente tesis se determinarán mediante técnicas geofísicas como herramienta principal los efectos al medio ambiente causados por infiltración de aguas residuales al subsuelo, a través de facturas o grietas por subsidencia en los cruces por los cuales fluyen aguas residuales o en donde las fracturas intersectan las redes de infraestructura hidrosanitaria. Para la selección de los sitios de estudio se utilizó la información del Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas (Sifagg) y fue necesario realizar una inspección física de campo para asegurarse que intersección estuviera ocurriendo, ya sea de fallas con las redes de infraestructura hidrosanitaria o con cauces superficiales por los cuales fluye agua residual. Se eligieron cinco puntos, dos en el municipio de Jesús María y tres en el municipio de Aguascalientes, en total se realizaron 19 pruebas de campo utilizando técnicas geofísicas, se levantaron muestras de dos lugares para realizar caracterización geotécnica en laboratorio. Los resultados indican que en el lugar la clasificación de suelo corresponde a arena limpia, mientras que el análisis de los perfiles de resistividad indica que hay infiltración de agua residual al subsuelo siguiendo una trayectoria vertical los primeros diez metros y posteriormente a una profundidad de 11 metros el flujo es solo horizontal en los puntos analizados.

ABSTRACT

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Objetivo General

Determinar los efectos al medio ambiente por la filtración de aguas residuales al subsuelo, debido a la ruptura de la infraestructura hidro-sanitaria por efecto de las fallas asociadas a subsidencia, o a la intersección de arroyos que conducen aguas residuales con dichas discontinuidades. Este trabajo se basa en la observación de perfiles de resistividad obtenidos en campo con base en técnicas geofísicas.

1.2 Objetivos Particulares

- A) Revisión del estado del arte para definir si existe una norma a aplicar, o una metodología a seguir para cumplir con el objetivo general de este trabajo.
- B) Establecer y caracterizar sitios donde se tenga el riesgo de infiltraciones a través de fallas asociadas a subsidencia.
- C) Caracterizar físicamente muestras colectadas de las zonas analizadas mediante pruebas de laboratorio. Los parámetros a caracterizar son porosidad, porcentaje de vacíos, porcentaje de humedad y conductividad hidráulica.
- D) Establecer las propiedades eléctricas en laboratorio y campo de la zona de estudio mediante la implementación de la técnica "box soil" y la aplicación de perfiles de resistividad eléctrica. La técnica box soil permite determinar la resistividad en laboratorio a muestras de suelo alteradas expuestas a contaminación por

agua residual, también será posible determinar la resistividad del agua residual y poder comparar los resultados con muestras de control respectivamente.

1.3 Alcances

El análisis propuesto para este estudio fue de tipo exploratorio principalmente basado en técnicas geofísicas, de las cuales se obtuvieron perfiles en 2D los cuales nos indican las áreas de contraste entre las zonas con diferentes humedades en el subsuelo. Otra razón analizada es que este tipo de técnica no es destructiva, lo cual significa que no es necesario abrir trincheras o hacer ningún tipo de excavación para determinar las zonas con mayor presencia de humedad. Se cuenta además con la ventaja que el resistivímetro se encuentra disponible en la Universidad Autónoma de Aguascalientes. Este estudio permitirá determinar los valores de resistividad en el subsuelo, que está relacionado directamente con anomalías de baja resistividad identificando así el riesgo de infiltraciones al subsuelo a través de fallas y fracturas asociadas a subsidencia. En particular se aplicó el método de resistividad eléctrica debido a que este método tiene buena resolución para la identificación de infiltraciones al subsuelo, lo que permite establecer contrastes entre zonas secas y húmedas (asociadas a una posible infiltración) del suelo en el sitio de estudio. El estudio se realizó en el municipio de Jesús María en cinco lugares específicos que por su ubicación permitieron la implementación de pruebas exploratorias de campo hasta una profundidad de entre 25 a 30 metros, así como la colecta de muestras para su análisis posterior en el laboratorio.

Mediante los resultados de este estudio se conocieron algunas propiedades geotécnicas cuantitativas de dos sitios como: porosidad,

humedad natural, relación de vacíos y conductividad hidráulica, lo cual abonó en la comprensión del problema y aportó datos para comprender el comportamiento de la filtración.

Mediante los perfiles de resistividad se muestran gráficamente zonas de baja resistividad asociadas con humedad en el subsuelo, por lo que estos perfiles aportan información importante sobre la contaminación por infiltración en la zona de estudio. Algunos de los datos que se aportan son, por ejemplo, dirección de flujo.

1.4 Justificación

El fenómeno de subsidencia es el movimiento vertical descendiente y gradual de terreno, mismo que en varios casos puede propiciar la aparición de discontinuidades (fallas o fracturas) superficiales, aunque en otros casos la subsidencia puede reactivar fallas y fracturas ya existentes. Este tipo de movimiento tiene un impacto negativo en toda la infraestructura subterránea y en particular en las instalaciones hidrosanitarias pudiendo causar rupturas, y por lo tanto liberando los líquidos contenidos al subsuelo.

En el municipio de Jesús María, Aguascalientes se presenta el fenómeno de subsidencia y discontinuidades asociadas. Dichas discontinuidades cruzan instalaciones hidrosanitarias y cauces superficiales por los cuales fluye agua residual. En la figura 1 se muestra un ejemplo de esta problemática.

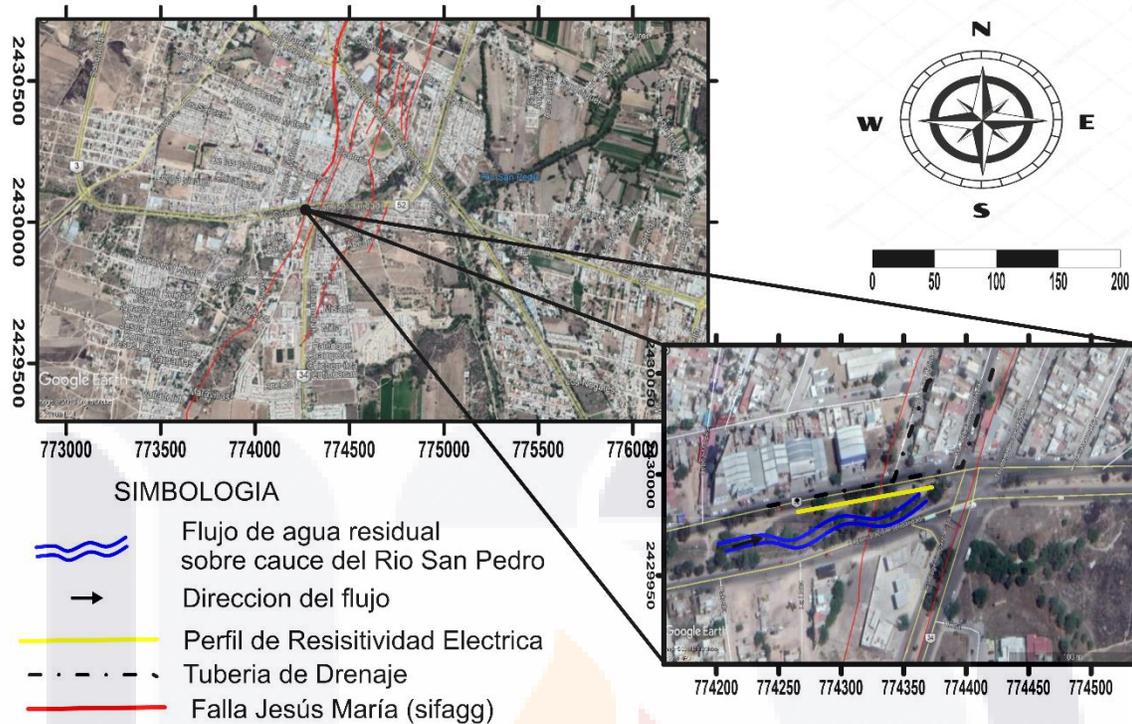


Figura 1.1.- Muestra sitio de estudio 1 y problemática en Chicachuales Jesus Maria.

Actualmente existen varias interrogantes referentes a este potencial escenario de riesgo tales como:

¿Realmente, dichas infiltraciones están ocurriendo?

Si las infiltraciones se están produciendo, ¿Qué profundidad alcanzan?, ¿Qué volumen de agua se está infiltrando? y ¿Qué implicaciones tiene este proceso de infiltración para el medio ambiente, en particular para el acuífero?

Este trabajo pretende generar información que nos permita dar respuestas a estas interrogantes.

1.5 Hipótesis

Con base en mediciones geofísicas de resistividad eléctrica podemos establecer si existen rupturas de la infraestructura hidrosanitaria por efecto de las fallas asociadas a subsidencia, o a la intersección de arroyos que

conducen agua servidas con dichas discontinuidades. Cuando la ruptura se establece, la técnica implementada en este estudio permite establecer el grado de contaminación al subsuelo y potenciales daños al acuífero y al medio ambiente, producto de la infiltración del agua residual que fluye a través del subsuelo.





CAPÍTULO

II

ANTECEDENTES.

COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS FALLAS Y FRACTURAS ASOCIADAS A SUBSIDENCIA

El centro de la ciudad de Aguascalientes se sitúa en las coordenadas $23^{\circ}17'34''$ N y $102^{\circ}42'02''$ O y la ciudad se encuentra en la región conocida como bajo mexicano (figura 2). Esta región comprende los estados de Aguascalientes, Jalisco, Guanajuato y Querétaro.

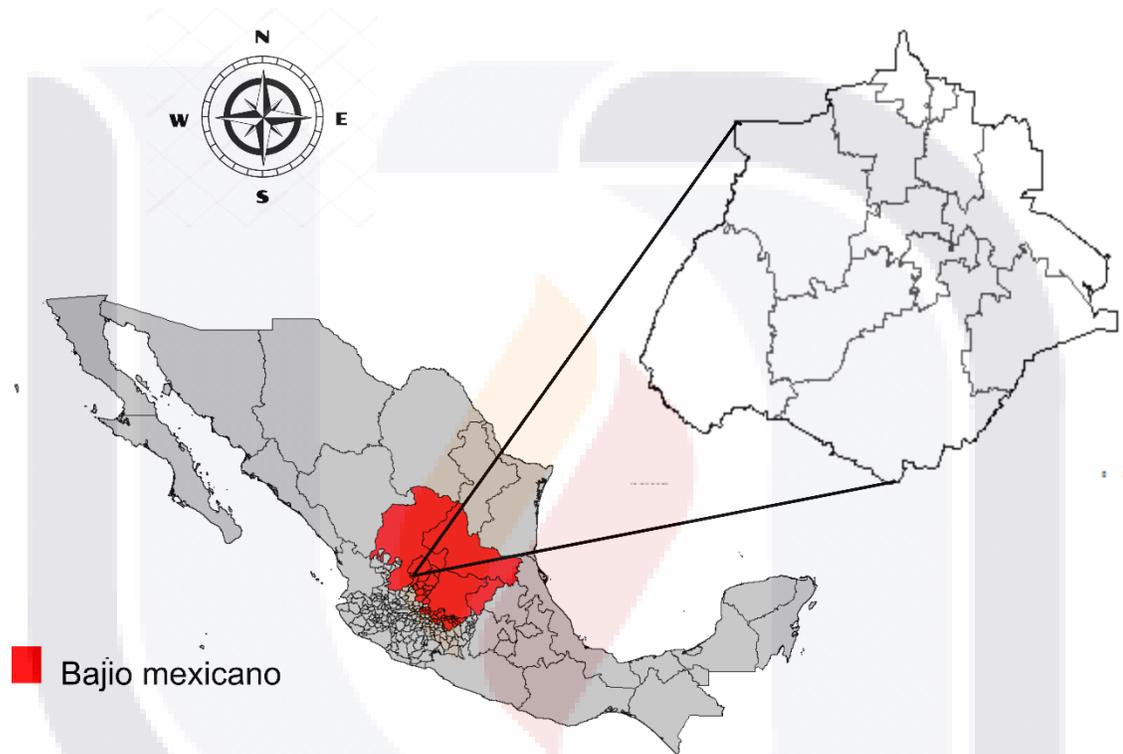


figura 2.1.- Se muestra la región conocida como Bajío mexicano y una ampliación del estado de Aguascalientes.

En la actualidad, en el estado de Aguascalientes ver figura 2.1 presentan un sistema de fallas y fracturas mismas que han sido tema de investigación de varios investigadores (Aranda-Gómez 1989) y (Pacheco-Martínez *et al.* 2013) Aranda-Gómez (1989), en su trabajo establece tres hipótesis, primero estableció la hipótesis que el origen del agrietamiento en el valle de Aguascalientes es consecuencia de actividad tectónica, también señaló que el valle de Aguascalientes puede formar parte de un sistema

muy amplio de estructuras de tensión, además en su segunda hipótesis Aranda-Gómez (1989), establece que el sistema de fallas puede estar relacionado con el abatimiento del acuífero en el valle de Aguascalientes, y finalmente en su tercera hipótesis establece que el sistema de fallas sea producto del flujo plástico del suelo y como consecuencia de la gravedad. Sin embargo, Aranda-Gómez (1989), después de analizar imágenes de satélite y cartografía geológica, sugiere que la sobre explotación del acuífero puede ser la causa del fallamiento.

Los daños originados en la infraestructura urbana causados por la compactación del acuífero sobreexplotado es un problema muy importante en el bajío mexicano. Entre las ciudades que han sufrido daños por subsidencia se encuentran Celaya en Guanajuato, en donde el gobierno del estado a través de protección civil del estado, ha reportado los daños a las construcciones y afectaciones a la infraestructura. En la ciudad de Querétaro se realizó el atlas de riesgo del estado a cargo de protección civil donde se reportan y mencionan los daños provocados por fallas y fracturas en la ciudad, y finalmente en Aguascalientes el municipio capital cuenta con el Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas (SIFAGG por sus siglas), a cargo de la secretaria de obras públicas del estado, donde se hace un inventario de las fallas y fracturas. El abatimiento a gran velocidad del acuífero sin dar tiempo a que se recargue naturalmente implica un impacto negativo y progresivo en el equilibrio del medio ambiente y en las comunidades próximas al acuífero (Castelazzi, et al., 2015).

Aguascalientes muestra las más altas cifras de subsidencia y variación espacial de las ciudades del centro de México, con excepción de la propia Ciudad de México. En Aguascalientes se muestran de 8 a 10 cm/año (Castellazzi et al. 2016).

Los impactos de la subsidencia son muchos y pueden ser clasificados en: económicos, sociales, ambientales, y de infraestructura (Hasanuddin et al. 2015). Las pérdidas resultantes afectan las construcciones y el medio ambiente. La figura 2.2 muestra un esquema de los impactos y sus efectos, en ella se puede observar que los costos de mantenimiento de la infraestructura afectada por subsidencia son más altos que los costos de mantenimiento en una red hidrosanitaria no afectada (Hasanuddin et al. 2015).

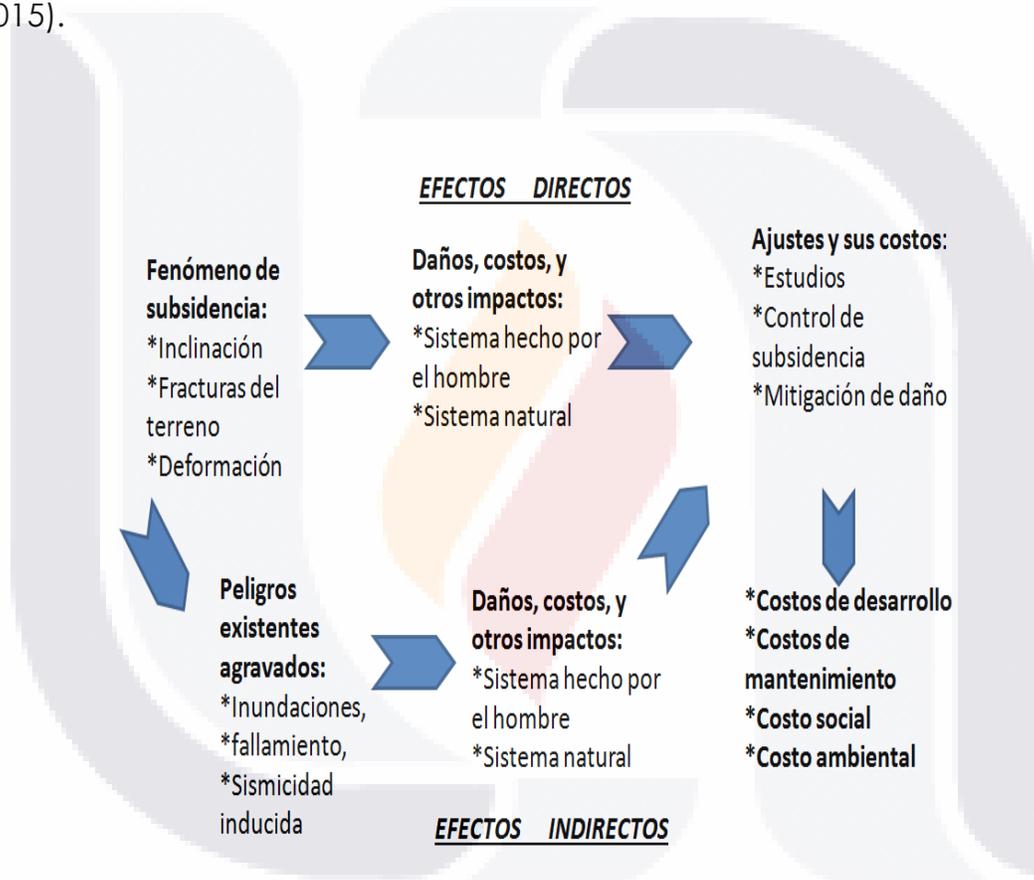
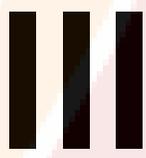


Figura 2.2- esquema de efectos derivados del fenómeno de subsidencia modificado de Hasanuddin et al. (2015).



CAPÍTULO



MARCO TEORICO

CAPITULO III: MARCO TEORICO

De acuerdo con UNAM-UAQ (2009), en Aguascalientes el subsuelo está conformado en la superficie por rocas sedimentarias detríticas formadas de depósitos aluviales no consolidados, los cuales se clasifican como: gravas, arenas limos y arcillas. Este acomodo presenta espesores de algunos metros hasta cientos de metros de espesor. Debajo de los depósitos aluviales se pueden encontrar rocas ígneas fracturadas.

De acuerdo con UAQ-UNAM (2002), en el valle de Aguascalientes el acuífero es de tipo libre y semiconfinado, mientras que su flujo es Norte-Sur. La ciudad de Aguascalientes se localiza sobre el sistema del acuífero Ojo caliente-Aguascalientes-Encarnación (Pacheco-Martínez *et al.* 2013), mismo que corresponde a un vasto sistema que abarca 3 estados de la república: Aguascalientes, Zacatecas y Jalisco.

PROPIEDADES HIDRAULICAS DEL SUELO.

El suelo es un complejo acomodo de minerales y partículas orgánicas de diferente composición, tamaño, forma y disposición, mientras que los poros o vacíos entre las partículas transmiten y retienen el aire y el agua. Las aguas residuales se alojan en ese sitio y pueden o no ser transmitidas a diferentes velocidades (*Environmental Protection*, 1980)

Aunque el suelo es capaz de tratar materiales orgánicos y patógenos contenidos en aguas residuales actuando como un agente de intercambio, el suelo puede absorber bacterias, amonio, nitrógeno y fosforo que son los principales componentes de las aguas residuales. Cuando son absorbidos estos elementos son neutralizados por la presencia del oxígeno y por algunas bacterias (*Environmental Protection* 1980). Cuando no hay condiciones aerobias, el fosforo y el amonio

reaccionan con los elementos presentes en el suelo como hierro aluminio o calcio haciendo más lento el deterioro y tránsito de estas sustancias.

PROPIEDADES ELECTRICAS DE LOS SUELOS

La resistividad eléctrica de un material (ρ) se define como la dificultad que opone dicho material al paso de la corriente eléctrica (Abu-Hassanein *et al.* 1996). Por otra parte, la resistencia eléctrica que opone un conductor es determinada por la resistividad de ese material y la geometría de ese conductor (Abu-Hassanein *et al.* 1996). Este parámetro se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{R * s}{l}$$

Dónde: R es la resistencia medida en ohms, s es la sección en cm y l es la longitud de los electrodos. La figura 3.1 muestra un esquema de la técnica denominada box-soil, un dispositivo utilizado en laboratorio para estimar la resistencia que ofrecen las muestras de suelo al paso de la electricidad y que en términos generales, consiste en una caja de acrílico con forma rectangular o cuadrada, la cual se conecta a la corriente mediante 2 terminales, esto permite determinar en el resistivímetro la resistencia de la muestra y las unidades son ohms (Ω) (Gastelum-Contreras *et al.* 2017).

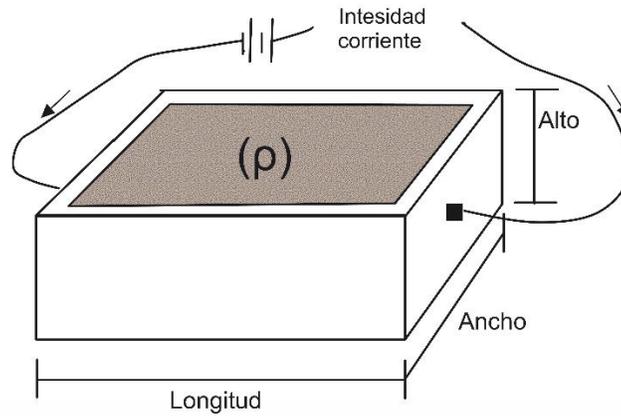


Figura 3.1.- esquema de funcionamiento box-soil para determinar resistividad en laboratorio tomado y modificado de norma G187-12a(2017).

La resistividad se mide en ohm-m u ohm-cm y depende de factores como: relación de vacíos, porosidad, humedad, temperatura. Según *Abu-Hassanein et al. (1996)*, la resistividad tiene una relación exponencial con el contenido de agua.

Desde el punto de vista del tamaño de las partículas de suelo, a mayor tamaño de grano mayor la resistividad. En la tabla 3.1 se muestra una comparación entre valores aproximados de resistividad de diferentes tipos de suelos y agua residual obtenidas de la zona de estudio.

Tabla 3.1.- Valores típicos de resistividad de suelos de acuerdo a su tamaño. Tabla tomada y modificada de *Perez-Garcia et al. (2010)*. Se agregan a esta tabla los valores medidos de agua residual de muestras tomadas de la zona de estudio.

MATERIAL	VALOR TIPICO DE RESISTIVIDAD (OHM*M)
Arcilla	40
Agua subterránea	50
Arena	2000
Agua destilada	2358.52
Agua residual (muestras 1 y 2)	17.62

Las técnicas de prospección eléctrica son baratas y rápidas en la obtención de resultados en comparación con la aplicación de métodos directos (Gastelum-Contreras *et al.* 2017). Los métodos directos como pozos a cielo abierto o trincheras de exploración implican mayor costo y son destructivos, de acuerdo a Gastelum Contreras *et al.* (2017). En su trabajo este mismo autor pudo determinar con técnicas geofísicas de resistividad eléctrica la humedad del suelo.

En los últimos 60 años se ha dado una mayor importancia a poder predecir la conductividad hidráulica a través de mediciones de resistividad eléctrica (Slater 2007). La conductividad hidráulica es vital para modelar transporte de solutos y flujo de aguas subterráneas, aunque no existe relación directa entre resistividad eléctrica y conductividad hidráulica, estos estudios se basan en que las dos dependen de la porosidad (Slater 2007).

Por su parte, los parámetros de resistividad eléctrica y porosidad se pueden relacionar, un ejemplo de ello es el trabajo realizado por Qazi *et al.* (2016), donde muestran el uso de resistividad en laboratorio para evaluar parámetros como: contenido de agua y porosidad. En su metodología estos autores tomaron 40 muestras de suelo a una profundidad de 0.50 m, utilizando la configuración *Wenner* por su fácil aplicación, obteniendo como resultado una relación lineal simple entre la resistencia eléctrica y propiedades físicas de suelo como: porosidad y contenido de agua.

En su trabajo de laboratorio Archie (1942), encontró que la resistividad del factor de formación, (se entiende por factor de formación como una constante que es independiente de R_w , y está en función de la geometría

de los poros), la resistividad del agua y la resistividad de la roca se relacionan de manera simple como lo muestra la siguiente ecuación:

$$R_0 = F R_w \tag{1}$$

Dónde: R_0 es la resistividad de la arena cuando los poros están completamente llenos de agua, R_w es la resistividad del agua, y F es la resistividad del factor de formación.

La resistividad del factor de formación está en función de la porosidad de las rocas, el autor encontró esta relación y la describió en la ecuación siguiente:

$$F = \theta^{-m} \tag{2}$$

Al sustituir este factor en la ecuación 1 queda:

$$R_0 = R_w \theta^{-m} \tag{3}$$

Dónde: θ es la porosidad y m es la pendiente de una línea imaginaria que es la representación gráfica de la relación entre resistividad del factor de formación y la porosidad. Los valores de m después de varias pruebas se han encontrado que varían entre 1.8 y 2 para arenas litificadas. El autor también encontró que para arenas empacadas en laboratorio el valor de m es de 1.3, por lo tanto, se puede deducir que para arenas sueltas o parcialmente litificadas el valor de m estaría entre el rango de 1.3 a 2 (Archie 1942).

Los métodos eléctricos de resistividad de corriente continua se rigen por la ley de Ohm que dice que la corriente viaja a través de un material conductor y es proporcional al voltaje como dice la fórmula:

$$V = IR \tag{4}$$

Donde R es la constante de proporcionalidad o resistencia y se mide en Ohms, V es el voltaje e I intensidad de la corriente. La resistividad eléctrica

en un volumen es la oposición del material al paso de la corriente y se mide en $(\text{ohm})(\text{m})$ (Meju, 2002)

Entonces en el subsuelo, la resistividad depende de algunos factores como textura, tamaño de poro, cantidad de fluido contenido este, existencia de fracturas o huecos (Meju, 2002).

Para determinar la resistividad eléctrica en el subsuelo existen diferentes arreglos que se pueden utilizar según el trabajo de Orellana (1982). De acuerdo a este autor, la selección de uno u otro depende de las características del problema a resolver, por ejemplo; la composición geológica a investigar, la profundidad de prospección, la potencia requerida de un arreglo en particular. A continuación, se mencionan los arreglos más comúnmente utilizados de acuerdo a Orellana (1982):

Schlumberguer

Es moderadamente sensitivo a estructuras verticales, alcanza una profundidad considerable y es bueno para cambios laterales de resistividad. Tiene un factor geométrico igual a $K = \pi n(n + 1)$.

Donde n es el nivel de exploración ver figura 3.3.

Wenner

Es sensible a cambios verticales de resistividad en el centro del arreglo, la fuerza de la señal es inversamente proporcional al factor geométrico, esto se traduce en que el arreglo *Wenner* es el más potente de los arreglos más utilizados. Tiene un factor geométrico igual a $K = 2\pi a$.

Donde a es la distancia entre electrodos.

Dipolo-dipolo

Es el más común debido a que es muy sensible a cambios verticales de resistividad, la profundidad de exploración es de $1/3$ de la extensión total

de arreglo. La potencia de la señal es baja. Tiene un factor geométrico igual a $K = \pi n(n + 1)(n + 2)a$.

En campo, el resistivímetro ya sea manual o automático levanta lecturas y esta información genera una pseudosección de resistividades aparentes. Los datos se levantan de la siguiente manera de acuerdo a la figura 3.3: cuando se pasa corriente entre los electrodos A y D se obtienen valores de voltaje medido entre los electrodos B y C esto es para el primer nivel $n=1$. Para el nivel $n=2$ cuando se pasa corriente entre los electrodos B y E se obtiene voltaje entre C y D. Si pasamos corriente entre A y E tenemos valores de voltaje entre B y D (Orellana, 1982).

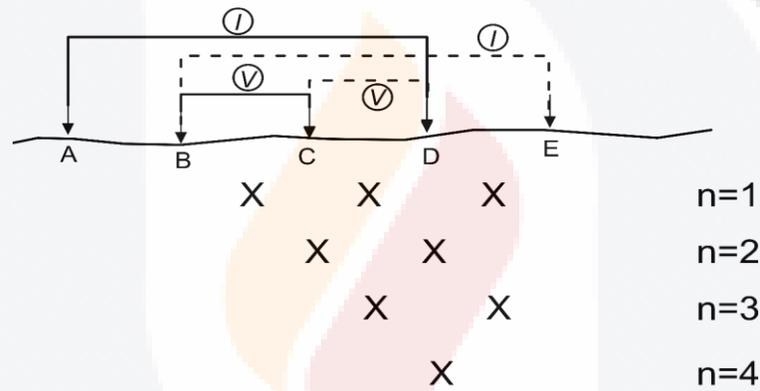


Figura 3.3.- esquema de medición en subsuelo con tomografía eléctrica resistiva, elaboración propia tomado (Meju 2002).

Generalmente para la configuración dipolo-dipolo se utilizan arreglos de doce electrodos, y de esos, dos inyectan corriente representados por las letras A y B, y otros dos miden la diferencia de potencial representados por M y N (Aizebeokhai, 2010). Este arreglo con la utilización de cuatro electrodos es gráficamente representado en la figura 4.3, y son utilizados en la ecuación para medir el diferencial de potencial de la siguiente manera:

$$\Delta V = U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

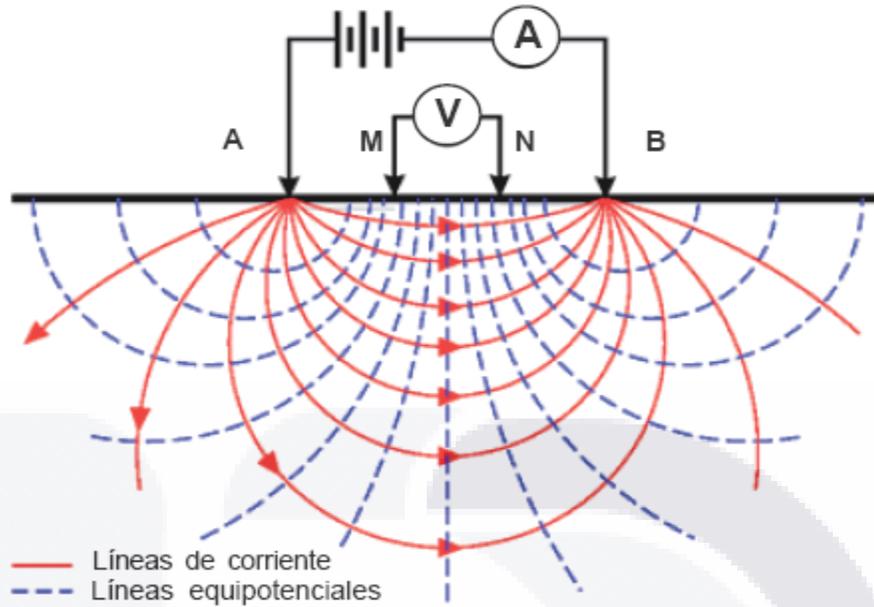


Figura 4.3.- esquema de funcionamiento resistividad eléctrica

La línea circular punteada en la figura 4.3 es una superficie equipotencial que representa los mismos valores de resistividad en cualquier punto si el medio fuera homogéneo. Pero como en el subsuelo el medio es heterogéneo, esto hace que los valores de resistividad sean diferentes en cualquier punto de esa línea equipotencial, obteniendo así una resistividad aparente, misma que depende de la separación de los electrodos y la ubicación, de la intensidad de la corriente y de la diferencia de potencial y se expresa así:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Donde K es el factor geométrico y depende del arreglo utilizado, en la imagen 4.4 se puede ver los electrodos conectados y colocados en el suelo según la configuración seleccionada.



Figura 4.4. Ejemplo de la colocación de los electrodos para el levantamiento de un perfil en campo. Los electrodos están colocados junto a los segmentos amarillos para fácil distinción. Los electrodos se observan conectados, clavados en el terreno y a la separación requerida entre ellos.

FLUJO DE AGUA EN EL SUELO Y LA PERMEABILIDAD.

Los suelos están compuestos generalmente por vacíos y partículas sólidas. La parte de vacíos puede estar ocupada parcial o totalmente por agua, la parte sólida puede estar ocupada por partículas de suelo o por materia orgánica (García-Cortés and Rodríguez 2006) (figura 4.5).

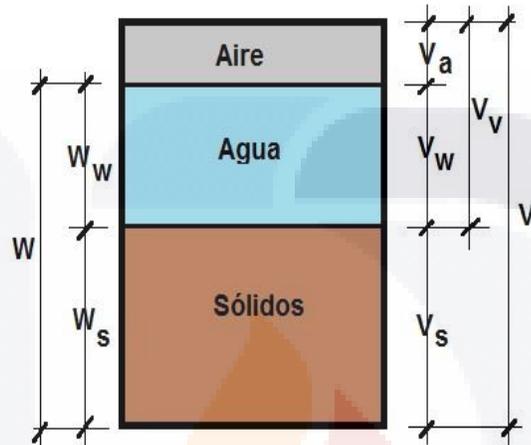


Figura 4.5.- fases que componen una muestra de suelo (Tomado y modificado de(García-Cortés and Rodríguez 2006)

Las propiedades hidráulicas son importantes para conocer las características del movimiento del agua. También nos sirve para conocer los procesos de erosión, de contaminación del suelo (Gabriels *et al.* 2011). El movimiento del agua en el suelo es a través de los poros conectados que existen y funcionan como canales.

En el suelo el agua se mueve de forma horizontal y vertical, esto lo determinará el porcentaje de humedad en el subsuelo, por ejemplo; en condiciones de saturación para una capa de suelo situada debajo del nivel freático, el movimiento del agua será principalmente horizontal y en menor grado vertical. En condiciones de suelo no saturado el movimiento

del agua será mayormente vertical ya que los poros están llenos de aire (Gabriels *et al.* 2011).

La conductividad hidráulica (K) es la propiedad del suelo que nos indica la dificultad con la que los poros del terreno permiten el flujo del agua, y está determinada por el tamaño de los poros, el número, la orientación, la distribución, y continuidad (Gabriels *et al.* 2011).

Para conocer el flujo del agua a detalle a través de medios porosos no saturados o parcialmente saturados, se puede recurrir a Richards, quien unió la ley de Darcy-Buchingham con el balance de masa que resulta de una ecuación de adveccion-difusion, donde las variables dependientes se pueden expresar en términos del contenido de humedad o matriz y ahora es conocida como la ecuación de Richards (Lo *et al.* 2017).

Así pues, durante la percolación del líquido la permeabilidad del suelo cambia, por lo tanto, cuando el suelo está seco la permeabilidad es muy alta y luego cae rápidamente hasta que el suelo se satura con agua (Filer and Statescu 2016). Desde ese instante la cantidad de agua que se infiltra al suelo es constante. Si la penetración de agua a la matriz de suelo ocurre por infiltración y si el agua satura el material, la circulación del agua en esa matriz de suelo estará en conformidad con la ley de Darcy (Filer and Statescu 2016). La cual nos dice:

$$v = k x i \quad (1)$$

Donde v es la velocidad de filtración promedio medida en cm/s ; k es la conductividad hidráulica o coeficiente de infiltración cm/s ; la i es el gradiente hidráulico o el gradiente de presión, el cual es adimensional.

Para suelos no saturados Richards se basó en la ley de Darcy y estableció la siguiente relación:

$$v = k(\theta) \times i \quad (2)$$

Donde $K(\theta)$ es la conductividad hidráulica dependiente de la humedad y se mide en cm/s ; (Richards, 1931).

El contenido inicial de agua es más importante para los suelos limosos-arcillosos, cuando el suelo tiene un alto contenido de arcilla, mayor es la capacidad del suelo de soportar tensiones. Para los suelos arenosos en cuanto a sus propiedades mecánicas no dependen tanto del contenido de agua si no de la densidad aparente (Saffih-Hdadi *et al.* 2009).

Según (Gabriels *et al.* 2011) la conductividad hidráulica (K) es una propiedad de los suelos que nos indica la facilidad con la que los poros del terreno permiten el paso del agua, y depende de la orientación, el tamaño, la continuidad y esto es importante ya que según (Orellana, 1982) el método de resistividad eléctrica permite conocer zonas de baja de resistividad asociadas con humedad.



CAPITULO IV: METODOLOGIA

Las siguientes actividades se desarrollaron para cumplir con el objetivo general y los objetivos particulares. Cada una de ellas incluye a su vez procedimientos y técnicas metodológicas de campo y de laboratorio explicadas en los siguientes puntos.

- 1) Revisión bibliográfica sobre métodos o normas de aplicación al problema estudiado, sobre el comportamiento hidráulico de las fallas y fracturas asociadas a subsidencia, y sobre el riesgo de contaminación del acuífero debido a la infiltración de agua a través de dichas discontinuidades.
- 2) Revisión conceptual de los métodos geofísicos de resistividad eléctrica y propiedades hidráulicas del suelo.
- 3) Identificación mediante cartografía de los cruces de las fallas y fracturas asociadas a subsidencia, con la infraestructura hidrosanitaria y de las corrientes superficiales de agua contaminada.
- 4) Exploración in situ de las condiciones de los sitios identificados en el paso anterior para determinar la viabilidad de implementar las mediciones geofísicas. Estos sitios debieron cumplir los siguientes requisitos: (1) Escaso o nulo tráfico de vehículos y peatones ya que interfieren con las mediciones geofísicas y (2) que los sitios estuvieran libres de rellenos antropogénicos que pudieran complicar la interpretación de los resultados.
- 5) Levantamiento de datos de tomografía eléctrica de resistividad en los sitios seleccionados con los arreglos dipolo-dipolo, polo-polo, polo-dipolo, *Schlumberguer* y *Wenner*. Para eliminar ambigüedades en la interpretación de los modelos de resistividad resultantes, se utilizaron solo los arreglos *Schlumberguer* y *Wenner*.
- 6) Recuperación de muestras alteradas e inalteradas de suelo y de agua contaminada en dos de los sitios seleccionados. Los sitios para este punto debieron cumplir con ciertas características como: las condiciones físicas

del sitio deberían permitir la toma de muestras inalteradas que no fueran camellones o banquetas ya que no está permitido excavar sin permiso, y fácil acceso para toma de muestras de agua residual.

- 7) Caracterización hidráulica y eléctrica de las muestras de suelo recuperadas.
- 8) Procesamiento de datos que incluyó la elaboración de 2 mapas a escala 1:5 con ubicación de los puntos estudiados. Por otro lado, se obtuvieron perfiles de inversión de datos de geofísica y elaboración de modelos de resistividad. Las pruebas de laboratorio incluyeron la aplicación de la prueba de box-soil para determinar las propiedades eléctricas, además la determinación de las relaciones volumétricas y gravimétricas. Para las pruebas de box-soil se obtuvo una tabla con los resultados, misma que permitió realizar un gráfico de una saturación de 100 ml, donde se graficaron los resultados de las pruebas para compáralas entre sí, ver grafica 5.1. Para los resultados de las relaciones volumétricas y gravimétricas se obtuvo una tabla con los resultados de porosidad, relación de vacíos, porcentaje de humedad y conductividad hidráulica, también se obtuvo una tabla para la clasificación SUCS con su respectiva gráfica.
- 9) Interpretación de resultados.

Se buscaron y seleccionaron cinco lugares específicos (Colonia Chichahuales, Comunidad Paso Blanco, Avenida fundición, Avenida Universidad, y Av. Guadalupe González), los cuales cumplieron con las características antes mencionadas. Cabe resaltar que para la realización de los perfiles se requirieron mínimo 60 m de largo para obtener una abertura de 5 m entre electrodos. Estos sitios además brindaron las condiciones necesarias para extraer muestras de suelo a una profundidad

de entre uno y cuatro metros. La figura 4.1 muestra la ubicación de los lugares seleccionados.

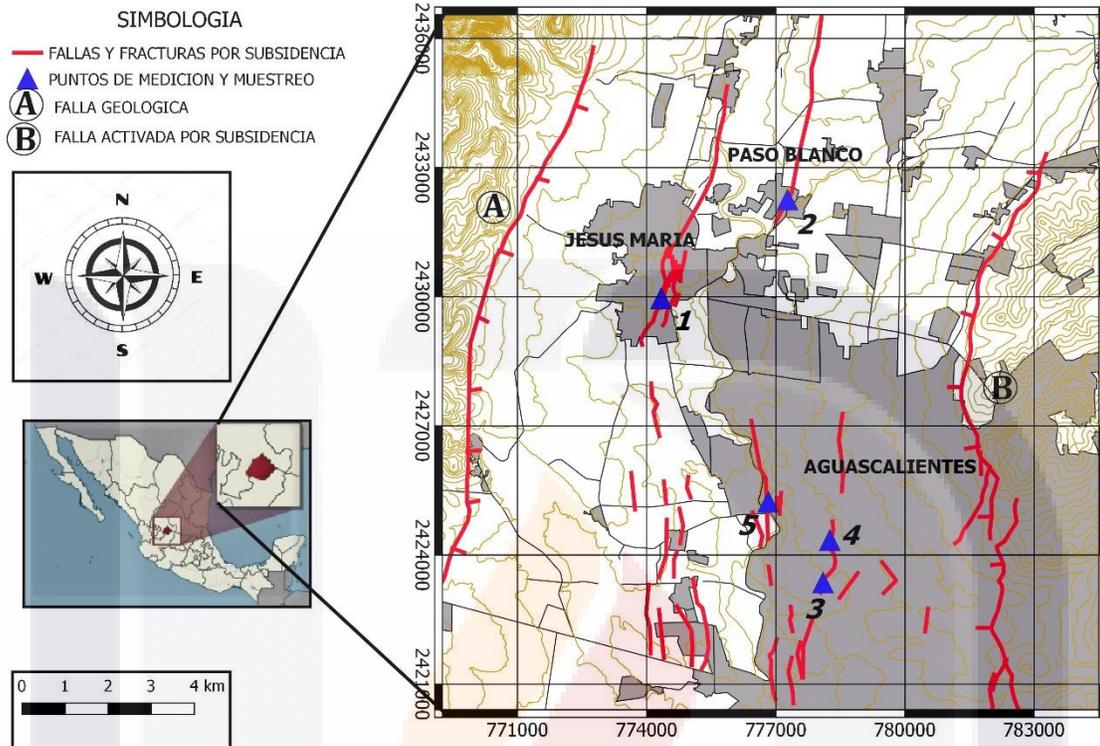


Figura 4.1.- lugares seleccionados para mediciones geofísicas y para obtener muestras para análisis de laboratorio las cuales se encontraron en la trayectoria de las líneas rojas, que a su vez representan el sistema de fallas y grietas en una porción del valle de Aguascalientes.

METODO GEOFISICO PARA CARACTERIZAR LA INFILTRACION.

El método seleccionado para caracterizar la infiltración en el lugar de estudio fue resistividad eléctrica, ya que este método nos permite identificar zonas de baja resistividad asociadas a humedad en el subsuelo (Orellana, 1982). El equipo que se utilizó consta de cables, conectores (caimanos), electrodos, resistivímetro y batería como se muestra en la figura 4.2.

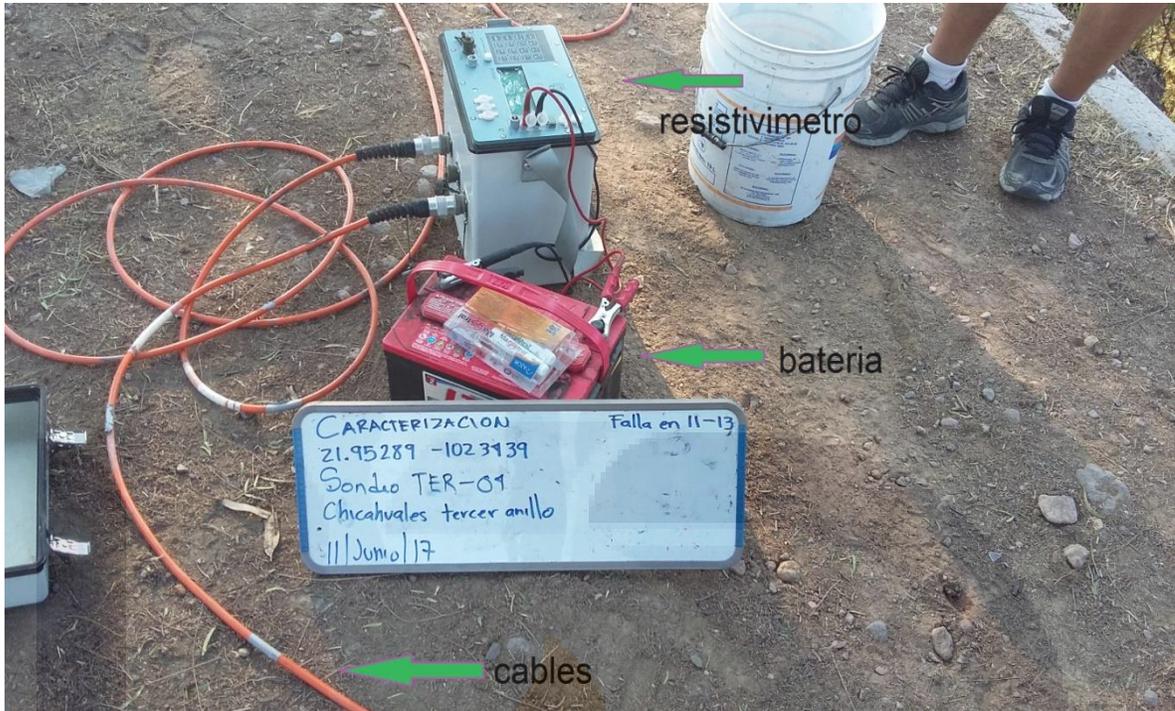


Figura 4.2.- Resistivimetro levantando datos de campo. Se muestran varios de sus componentes.

La resistividad eléctrica en 2D con una configuración dipolo-dipolo, *Wenner* y *Schlumberguer*, con un acomodo de los electrodos a cada 2.5, 5 y 10 m nos permite identificar con gran precisión las zonas de baja conductividad, El procesamiento de los datos obtenidos se hizo con los programas de cómputo *Res2DINV*, *Zond res 2d*, y *Surfer*.

PRUEBAS DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACION DE RELACIONES VOLUMÉTRICAS Y GRAVIMÉTRICAS.

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, utilizando una muestra inalterada en Jesús María, (puntos 1 de la figura 4.1). Las determinaciones de laboratorio correspondieron a relaciones volumétrica y gravimétricas. Específicamente se determinó

porosidad, porcentaje de humedad, relación de vacíos y conductividad hidráulica de acuerdo a la norma (ASTM,1993). Las muestras tenían un peso de 12 kg cada una y se extrajeron a una profundidad de entre 1 y 4 m respectivamente, cuidando que no hubieran estado expuestas a contaminación por agua residual. La importancia de las pruebas de relaciones volumétricas y gravimétricas radica en que los resultados permiten conocer las condiciones del subsuelo y la velocidad de la infiltración del agua al subsuelo, para posteriormente estimar la cantidad de agua que se infiltra por unidad de área o volumen.

ANALISIS GRANULOMETRICO POR MALLAS S.U.C.S.

Se realizó la clasificación de suelo mediante el sistema de clasificación de suelos a la muestra alterada de 1 sitio 1 con un peso de 1241.28 gramos cada una. Se realizó el tamizado de las muestras en laboratorio a través de las mallas número 4, 2, 1½, 1, ¾, ½ para arena, y para gravas se utilizaron las mallas número 10,20,40,60,100 y 200.

APLICACIÓN DE LA TÉCNICA BOX-SOIL.

Este procedimiento permite medir la resistividad a muestras de suelo en laboratorio. La medición se realizó a las muestras en las condiciones naturales (insaturadas) y en laboratorio se saturaron, como lo describe Abu-Hassanein *et al.* (1996). Las unidades de los valores obtenidos son en *ohm-cm*. En este caso, para esta técnica fue utilizada una caja de acrílico de 22.2 cm de largo, 3.9 cm de ancho y 3.2cm de alto, un área es de 12.48 cm², y una distancia entre electrodos (*d*) de 22.2 cm (figura 4.5). El

objetivo de esta técnica fue determinar cómo cambian las propiedades de resistividad eléctrica del terreno en presencia de líquidos contaminantes y no contaminantes. el procedimiento de laboratorio se realizó de acuerdo a la norma G187-12a (ASTM 2017). Para el procedimiento primero se pesaron 6 muestras de suelo contaminado y 6 muestras de suelo no contaminado de 400 gr cada una. Las muestras de suelo contaminado se saturaron con 50, 75, y 100 ml de agua destilada, se registró la temperatura y se anotó la resistencia medida. Las muestras de suelo no contaminado se saturaron con agua residual tomada del sitio de estudio con cantidades de 50, 75, y 100 ml, se registró la temperatura y se anotó la resistencia medida. La figura 4.6 muestra la caja de acrílico que se utilizó para la prueba de box-soil conectada a los electrodos para determinar la resistencia de la muestra contenida.



Figura 4.6.- La prueba prueba de box-soil, se observa la caja de acrílico con la muestra de suelo en su interior, además en ese preciso momento se está tomando la temperatura de la muestra previo a determinar la resistencia.



CAPÍTULO

V

RESULTADOS

CAPITULO V: RESULTADOS

Se presentan los resultados obtenidos en cada punto de medición, además se presentan resultados de la técnica de box-soil. y finalmente resultados obtenidos de pruebas de laboratorio para determinar relaciones volumétricas y gravimétricas de los suelos.

MEDICIONES GEOFISICAS

Las descripciones de los modelos resultantes se presentan para cada punto de medición en las figuras 5.1 a 5.18 agrupadas por punto estudiado.

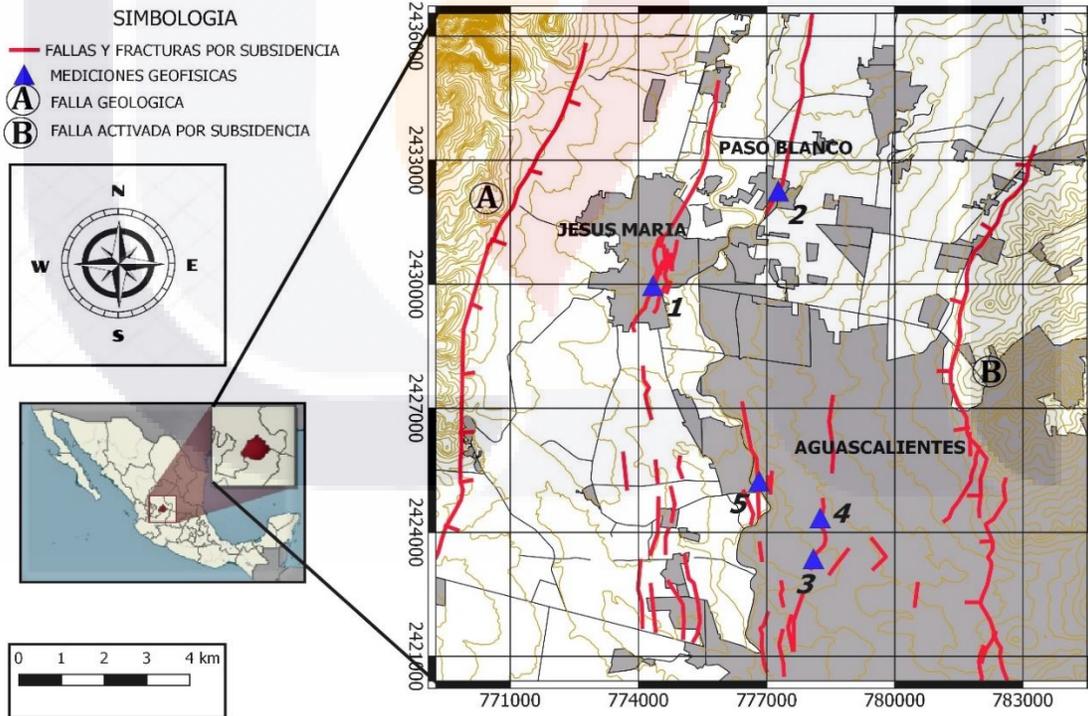


Figura 5.1.- muestra los 5 puntos de mediciones geofísicas

PUNTO DE MEDICION TER-01

El sitio se localiza al sur de la población de Jesús María sobre avenida siglo XXI en el cruce de la falla Jesús María y el río San Pedro con coordenadas $21^{\circ} 57' 10.19''$ N y $102^{\circ} 18' 53.58''$ O (figura 5.2). En el sitio, la falla es evidente por un escarpe de 8 cm de dirección norte-sur y con el bloque bajo cayendo hacia el oriente.

En esta zona se puede observar que el río San Pedro lleva agua residual principalmente de las descargas de las viviendas de la zona.

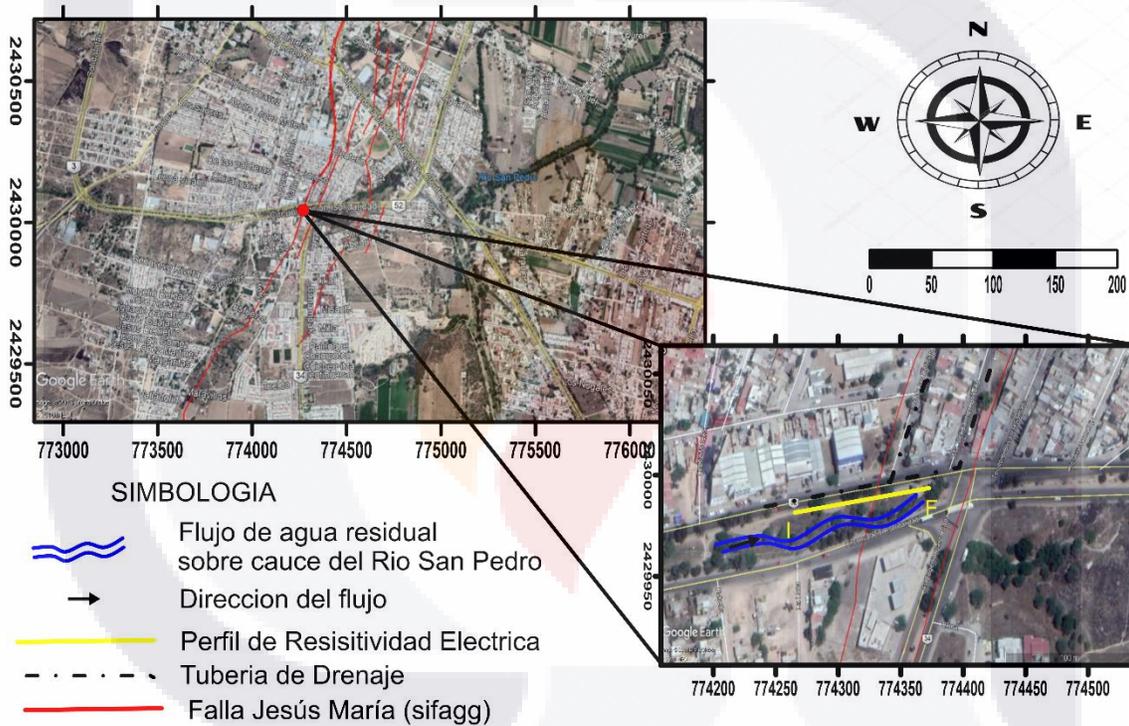


figura 5.2. Localización del punto de medición TER-01.

A partir de lo mostrado en la figura 5.3 se discute lo siguiente: en los perfiles con mayor resolución (es un zoom al polígono de contorno color blanco) (a y b) se observa un estrato muy resistivo hasta los 4 m de profundidad con una discontinuidad al centro que coincide con la ubicación de la falla. Se observa también que la zona de falla presenta una resistividad

menor en comparación con su entorno inmediato, debido probablemente a que retiene mayor humedad, se observa grandes anomalías de baja resistividad a partir de los 4 m hasta los 8 m, lo cual se asocia con humedad en el subsuelo, sugiere intrusión por los planos de la falla y el flujo es vertical por al menos 8 m. En el perfil c) se observa el paquete de estratos bien definidos, porque se pueden ver los cambios de valores de resistividad, primero el amarillo, después el verde y por último el azul desde resistividades altas de 70ohm-m hasta valores de 1.4 ohm-m pasando por valores intermedios de 9 a 12 ohm-m, también se observan discontinuidades en el primer estrato el cual es el más resistivo. Las discontinuidades corresponden nuevamente con la ubicación de la falla, se observa que después de los 10 m de profundidad hay grandes anomalías de baja resistividad lo cual se asocia a humedad en el terreno. Finalmente, en el perfil del inciso d) se obtiene mayor profundidad de exploración debido a la separación de los electrodos, la cual fue de 10 metros. En este perfil se observan los estratos superiores bien definidos por que el contraste es muy fuerte, sin embargo, no se aprecian discontinuidades. Las anomalías observadas son de baja resistividad (color azul) que siguen una dirección horizontal a una profundidad de 8 a 10 m embebidas en un estrato un poco más resistivo (color verde). Después de los 15 m de profundidad se aprecia lo que parece ser una lente de material con alta resistividad (color naranja), el cual se incrusta en un estrato menos resistivo (color verde), debido tal vez a que existen rellenos no consolidados rodeando material bien consolidado o bien es el comportamiento de la humedad en el subsuelo.

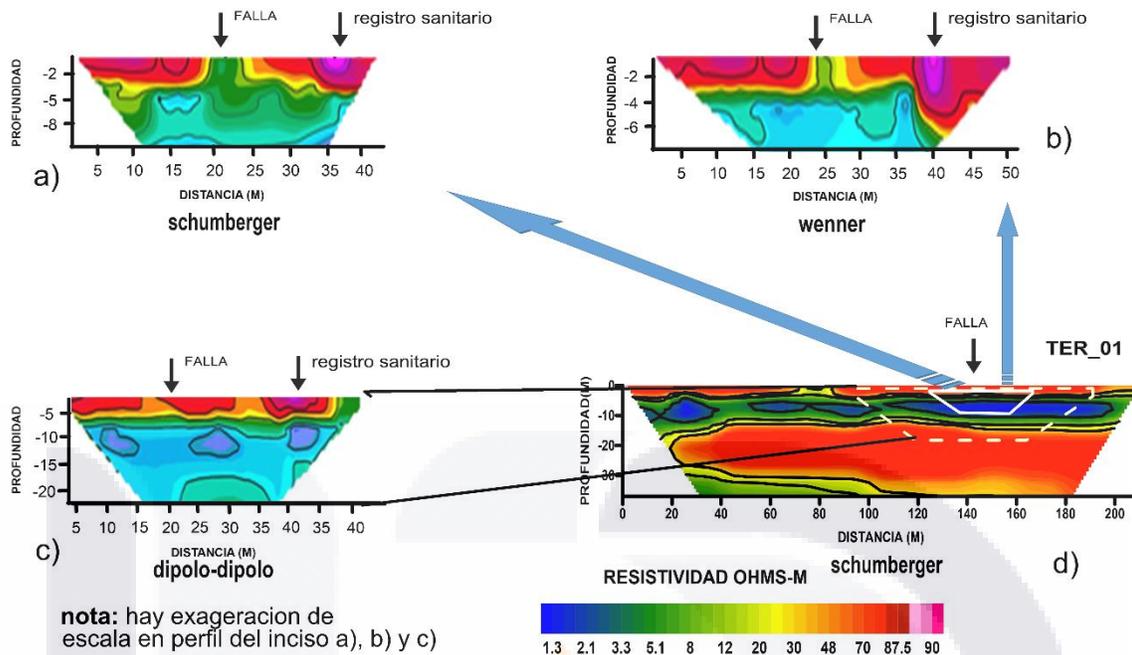


Figura 5.3 Tomografía Eléctrica Resistiva que corresponde al lugar TER_1. Se muestran los perfiles obtenidos en sitio. Incisos a) y b) Comparación de perfiles con arreglos *Schlumberguer* y *Wenner* con su respectiva escala, la escala y posición se muestra en perfil del inciso d) con líneas blancas (polígono más pequeño). inciso c) Perfil de resistividad obtenido en sitio, así como la ubicación de falla con un arreglo dipolo-dipolo a escala. El inciso d) muestra el perfil de resistividad obtenido en sitio así como ubicación de falla con el arreglo *Schlumberguer*.

PUNTO DE MEDICION TER-02

El sitio se localiza al norte del Municipio de Jesús María, sobre la carretera que lleva a la comunidad de Paso Blanco, en donde se cruzan el río San Pedro y la falla "Las Jaulas". Este punto tiene las siguientes coordenadas 21° 58' 22.75" N y 102° 18' 53.58" O (figura 5.1). En el sitio, la falla es evidente ya que del lado norte de ésta se observa una abertura superficial de hasta 2 m de ancho por 60 m de largo, mientras que el bloque bajo cae hacia el poniente. El río San Pedro conduce agua residual de las descargas de las viviendas de la zona, así como desechos de queso de una fábrica ubicada en sus cercanías.

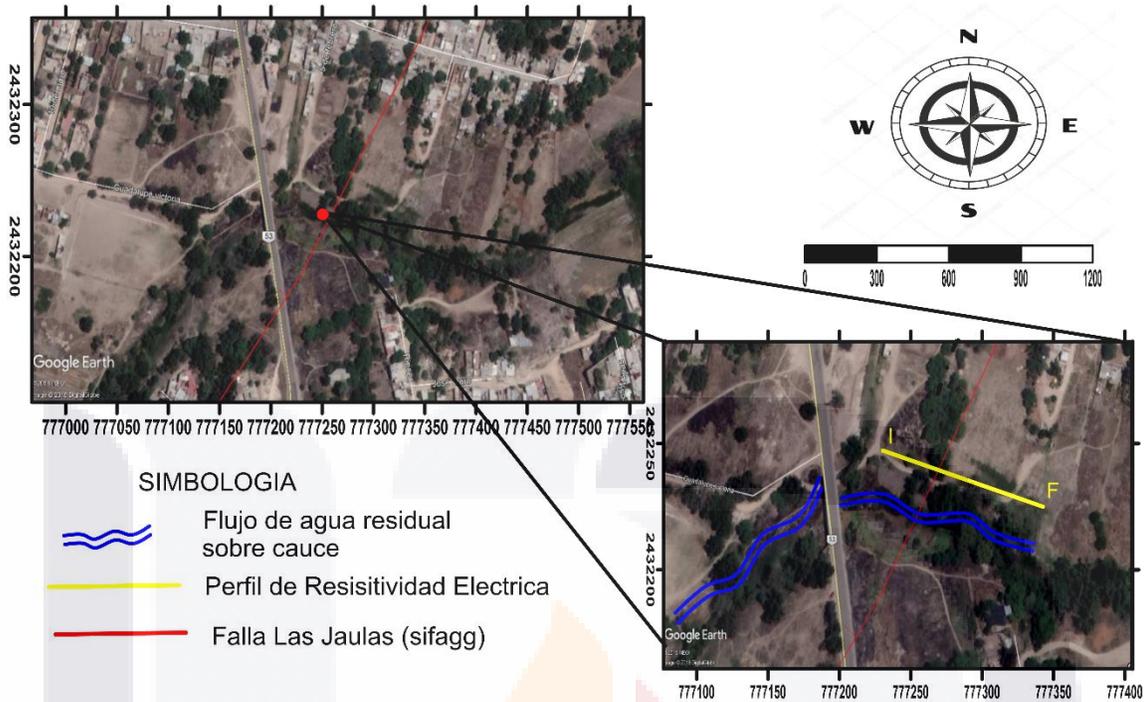


figura 5.4. Localización del punto de medición TER-02.

A partir de lo mostrado en la figura 5.5 se discute lo siguiente: En el perfil a) se observan los estratos bien definidos debido al alto contraste de resistividad, mientras que la alta resistividad del estrato superior puede ser debido a la desecación superficial. Se pueden observar algunas discontinuidades que corresponden con la ubicación de la falla, mientras que después de los 5 m se puede apreciar un estrato un poco menos resistivo de color verde, después, podemos apreciar una gran área de anomalías de baja resistividad de color azul que se podrían asociar con infiltración. También se puede observar lo que parece ser una “pluma de intrusión” con un azul más claro. En el perfil b) se puede observar el paquete de estratos bien definidos debido al alto contraste, mientras que el estrato superior muestra mayor resistividad, en este mismo estrato se observa una discontinuidad, es posible que sea un bloque de la falla y que los tonos en colores amarillos y verdes sean rellenos no consolidados.

Se observa una franja de color verde misma que corresponde a resistividades menores. En ella se observa una gran mancha de color azul que indica la presencia de anomalías de baja resistividad posiblemente asociadas a humedad. EL último estrato de color más amarillo (más resistivo que el inmediato superior, pero menos que el estrato superior de color naranja) indica que el material está un poco más consolidado y no presenta muy poca de humedad.

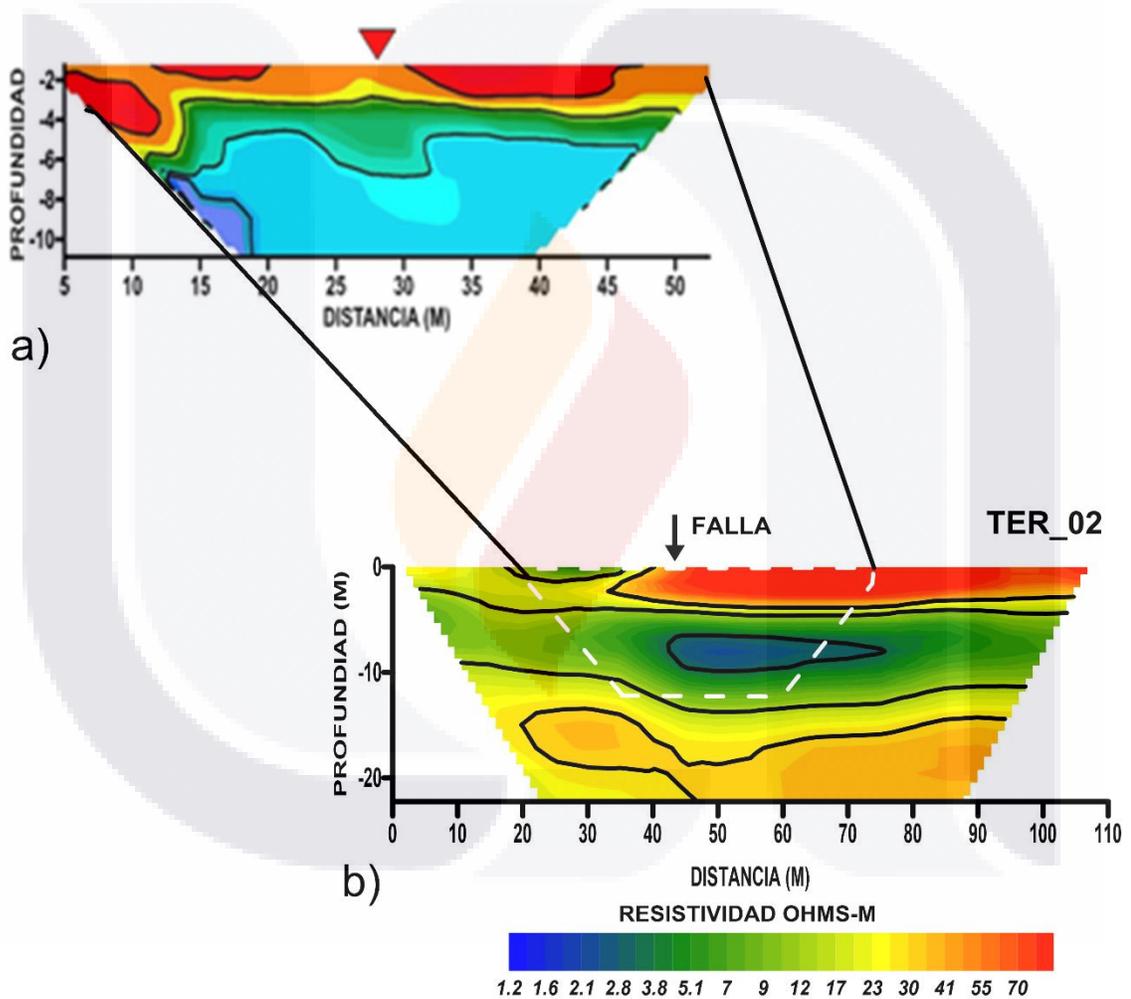


figura 5.5 TER-02. Perfiles de resistividad obtenidos en sitio TER-02. inciso a) Perfil de resistividad obtenido, así como ubicación de falla debajo de la marca con un arreglo dipolo-dipolo. inciso b). Perfil de resistividad obtenido con arreglo Schlumberguer.

PUNTO DE MEDICION TER-03

El sitio se localiza sobre Avenida fundición a la altura de la calle Felipe Ruiz de Chávez en el Municipio de Aguascalientes con coordenadas 21° 53'35.39" N y 102° 18' 33.22" O (figura 5.1). El estudio se realizó exactamente donde se cruza Av. Fundición con la falla San Cayetano – Miravalle, el bloque bajo se observa hacia el poniente, cabe mencionar que en el sitio la falla no se aprecia a simple vista.

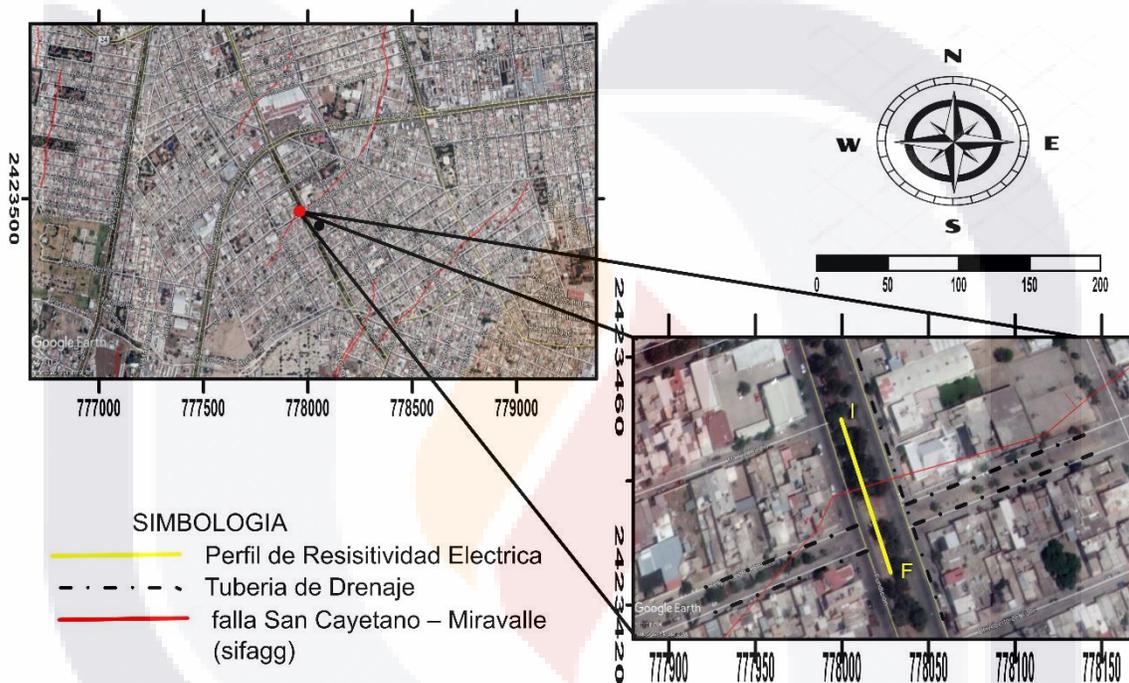


figura 5.6. Localización de TER_03.

A partir de lo mostrado en la figura 5.7 se discute lo siguiente: El perfil del inciso a) no muestra estratos solo una gran anomalía de baja resistividad posiblemente debido a rellenos no consolidados. Hacia una profundidad de 20 m se puede ver una zona muy resistiva posiblemente a causa de algún material bien consolidado. En el perfil del inciso c) se puede ver más definido debido al contraste de estratos, se observa que el primer estrato que se encuentra en la superficie es muy resistivo y en el perfil a) no se observa esto, la causa es que la medición del perfil del inciso a) se realizó

en temporada de lluvias como lo muestra la imagen b) donde se aprecia humedad en el suelo, y la medición del perfil c) se realizó en temporada de estiaje. En el perfil del inciso c) también se puede ver anomalías de resistividad baja (color azul) embebidas en un área más extensa y más homogénea de valores de resistividad de 3.8 a 17, que puede corresponder a rellenos no consolidados. En la parte baja del perfil se puede observar la misma área de resistividades altas que corresponde a material más consolidado.

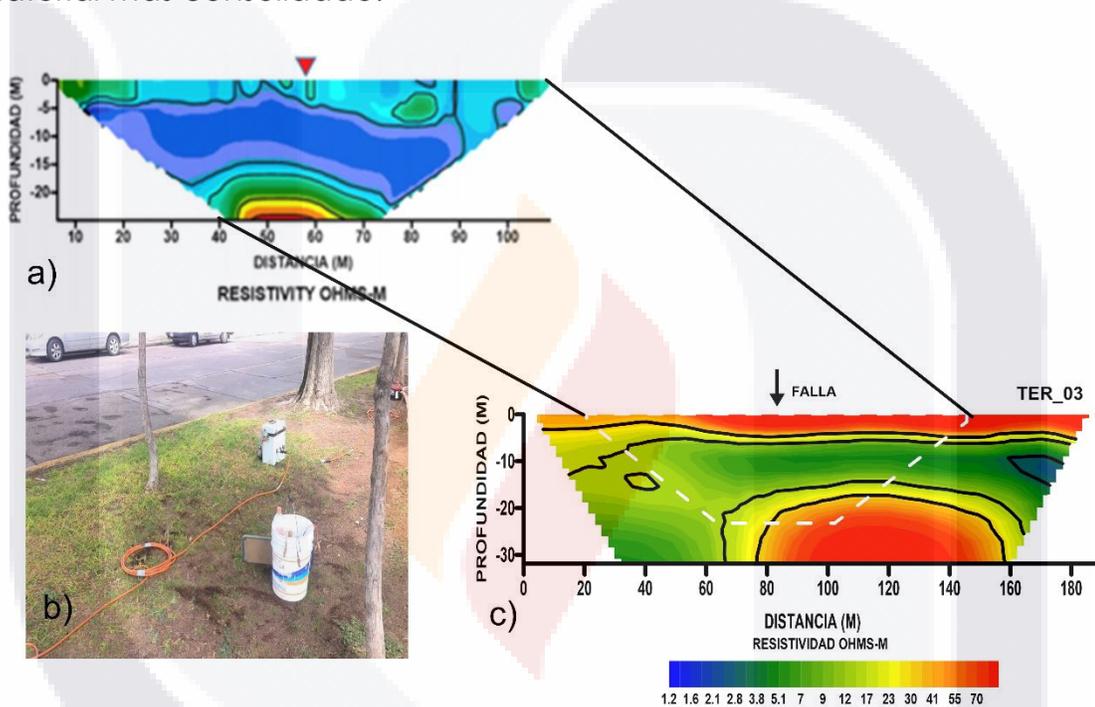


figura 5.7 TER_03. Perfiles de resistividad obtenidos en sitio. inciso a) Muestra el perfil de resistividad obtenido, así como ubicación de falla debajo de la marca roja con un arreglo dipolo-dipolo a escala, la escala corresponde a la línea punteada. inciso c). Muestra el perfil de resistividad obtenido, con el arreglo elegido después de las comparaciones que es *Schlumberguer*.

PUNTO DE MEDICION TER-04

El sitio se localiza sobre Avenida Universidad a la altura de la calle San Rafael con coordenadas 21° 54' 03.45" N y 102° 18' 23.87 " O (figura 5.1). El estudio se realizó donde se cruza la falla San Cayetano - Miravalle con

Av. Universidad, el bloque bajo hacia el poniente. En el sitio la falla es evidente ya se encuentra un escarpe de 11 cm sobre la carpeta asfáltica

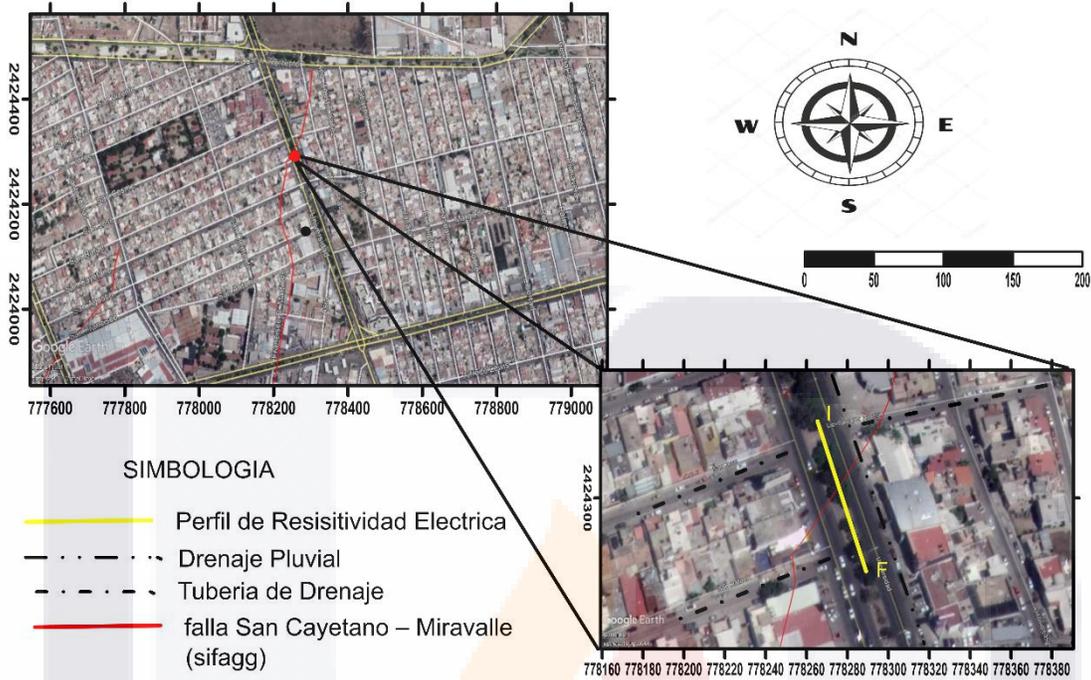


figura 5.8. Localización de TER_04.

A partir de lo mostrado en la figura 5.9 se discute lo siguiente: En el perfil del inciso a) se observa un paquete de estratos pobremente definido ósea que no existe mucho contraste, el estrato superior vemos áreas con resistividades altas dentro de otro estrato con resistividades un poco más bajas en tonos amarillos y rojos, debajo podemos observar un estrato de color verde lo cual indica un estrato con contenido de humedad, más, abajo vemos una gran zona de anomalías de baja resistividad correspondiente a humedad en el subsuelo. En el perfil del inciso b) vemos los estratos un poco más definidos con más contraste entre ellos, el estrato superior es el área más resistiva probablemente por acción del medio ambiente, inmediatamente después vemos un estrato en tonos amarillos lo cual indica que no hay rastro de humedad en el terreno, después vemos un estrato en tonos verdes, siendo esto evidencia de humedad en el subsuelo, en este estrato se aprecia un área con anomalías con baja

resistividad en color azul, lo cual indica una gran concentraciones humedad, después de los 15 m de profundidad vemos en el perfil que el estrato en de color amarillo lo cual indica que es un material que de alguna manera no ha tenido contacto con la humedad.

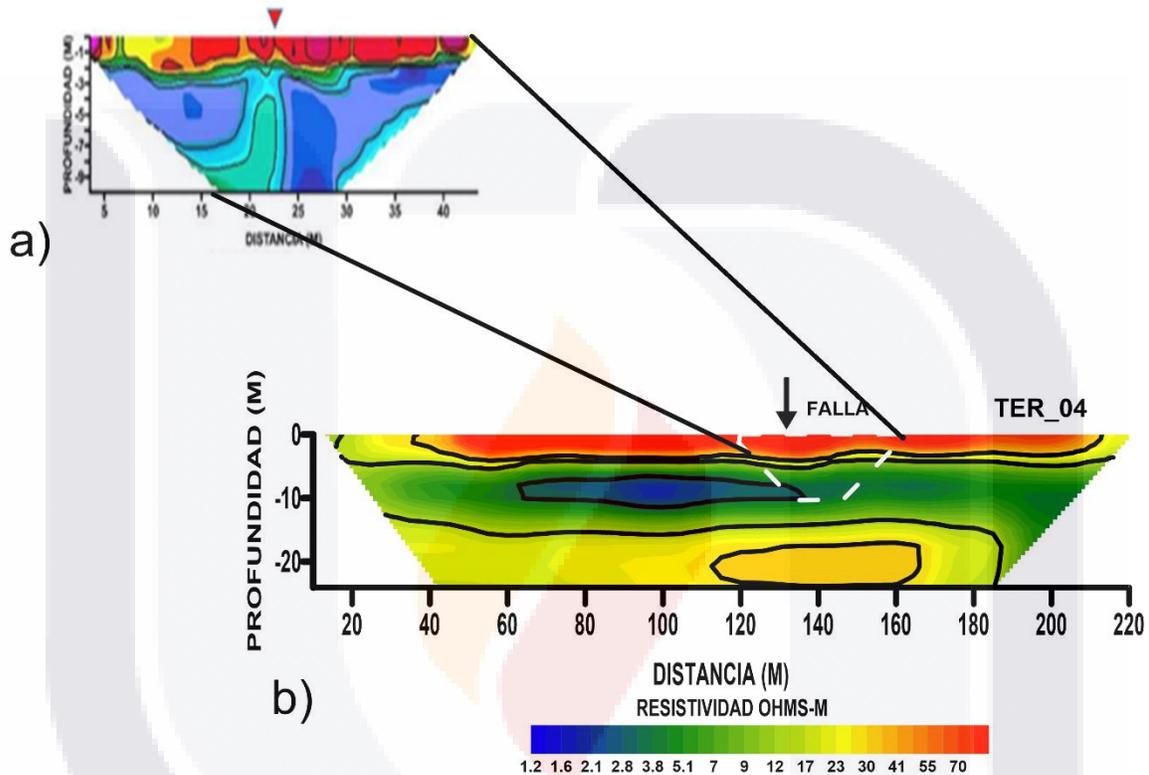


figura 5.9 TER_04 Perfiles de resistividad obtenidos en sitio 4. Inciso a) Muestra el perfil de resistividad obtenido, así como ubicación de falla debajo de la marca roja con un arreglo dipolo-dipolo a escala, la escala corresponde a la línea punteada dentro del perfil del inciso b. inciso b). Muestra el perfil de resistividad obtenido, con el arreglo *schlumberguer*.

PUNTO DE MEDICION TER-05

El sitio se localiza sobre Avenida Guadalupe González a la altura de la calle los patos de coordenadas 21°54' 34.36" N y 102° 19' 05.67" O (figura5.1). el estudio se realizó donde cruza la falla Colinas - Campestre con Av. Guadalupe González el bloque bajo es el poniente, en el sitio, sobre la superficie de rodamiento no se aprecia la falla a simple

vista, pero después de una inspección más detallada del lugar se puede observar la falla, aunque ya en terreno de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, con un escarpe de 80 cm

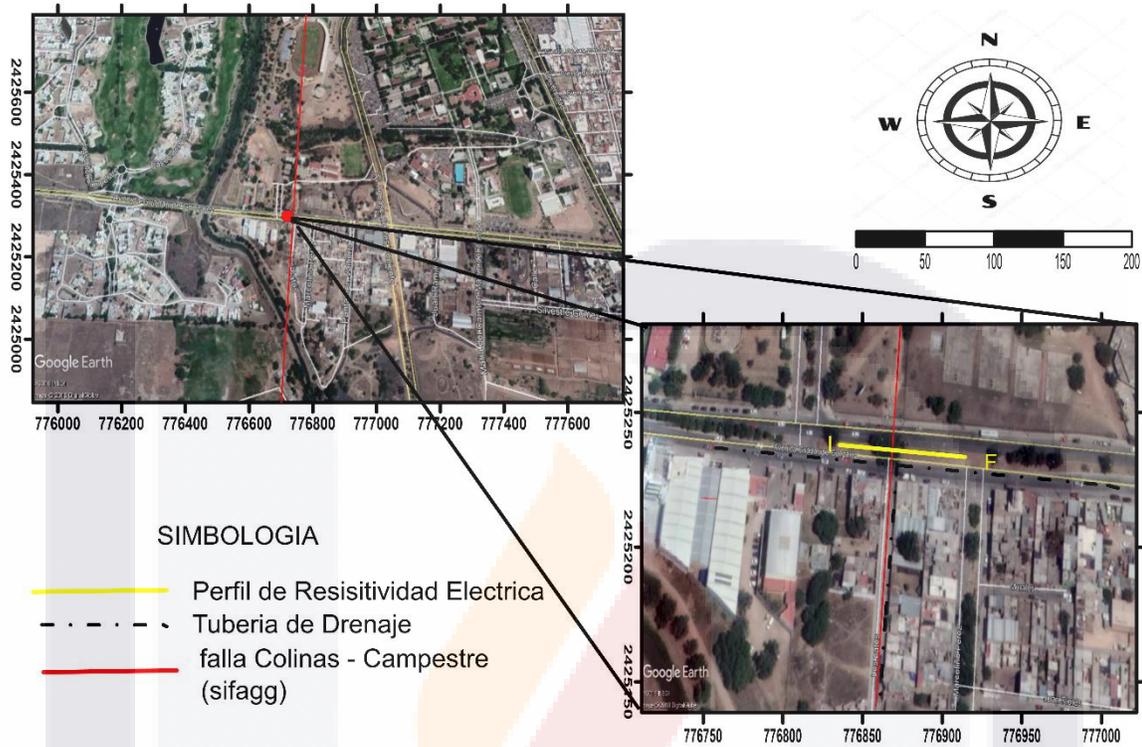


figura 5.10. Localización de TER_05.

A partir de lo mostrado en la figura 5.11 se discute lo siguiente: En el perfil a) vemos lo que parece ser algún material bien consolidado o impermeable, es discontinuo emerge hasta la superficie del lado izquierdo de la falla, en general todo el perfil muestra resistividades bajas, y dos áreas en color azul que se interpretan como anomalías de baja resistividad, en el inciso b) podemos observar lo que parece ser rellenos ya que no tiene un paquete de estratos bien definido, se aprecia una línea diagonal de izquierda hacia la parte derecha y arriba del perfil con áreas de anomalías de baja resistividad.

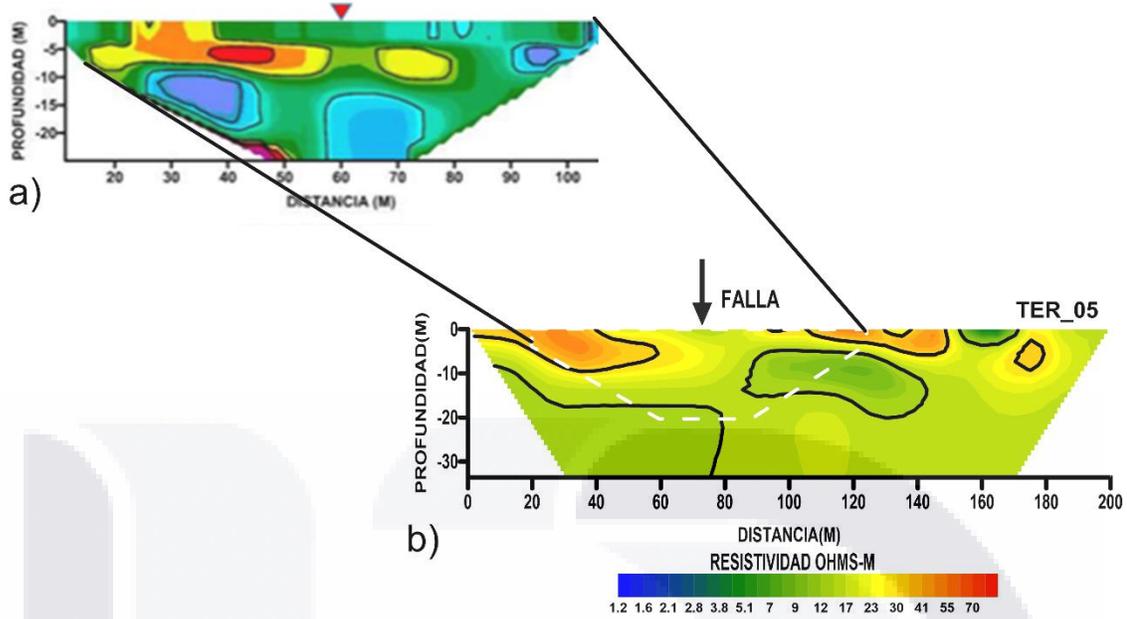


figura 5.11. TER_05 Perfiles de resistividad obtenidos en sitio 5. En el inciso a) Muestra el perfil de resistividad obtenido, así como ubicación de falla debajo de la marca roja, con un arreglo dipolo-dipolo a escala la escala se muestra con la línea punteada en color blanco dentro del perfil del inciso b. en el inciso b). Muestra el perfil de resistividad obtenido, con el arreglo elegido después de las comparaciones que es Schlumberguer.

RESULTADOS DE RESISITIVIDAD EN LABORATORIO MEDIANTE LA BOX-SOIL

Mediante la utilización de la box-soil, se pudo determinar la resistividad de una muestra de suelo saturada con agua destilada y agua residual proveniente del rio San pedro. Los resultados de manera general mostraron que el agua residual permite el paso de corriente eléctrica más fácilmente.

Tabla 5.1.- muestra los resultados de las resistividades calculadas para cada muestra.

MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	CANTIDAD DE AGUA	LIQUIDO DE SATURACION	RESISTIVIDAD OBTENIDA Ohm-cm
1	Contaminada	100 ml	Agua Destilada	871.35
2	Contaminada	75 ml	Agua Destilada	801.08
3	Contaminada	50 ml	Agua Destilada	879.78

4	No Contaminada	100 ml	Agua Contaminada	1900.11
5	No Contaminada	75 ml	Agua Contaminada	1815.78
6	No Contaminada	50 ml	Agua Contaminada	2883.89
7	Contaminada	100 ml	Agua contaminada	832
8	Contaminada	75 ml	Agua contaminada	893.84
9	Contaminada	50 ml	Agua contaminada	1011.89
10	No Contaminada	100 ml	Agua destilada	2240.22
11	No Contaminada	75 ml	Agua destilada	2366.7
12	No Contaminada	50 ml	Agua destilada	3153.73
13	Agua Destilada	250 ml		235852.32
14	Agua Contaminada	250 ml		1762.38

El gráfico de la figura 5.12 y la tabla 5.2 muestran los resultados de la técnica de box-soil para los suelos a los que se agregaron 100ml, que es la mayor cantidad de agua utilizada en las pruebas de laboratorio, logrando con esto que una mayor cantidad de poros contengan agua ya sea destilada o residual según sea el caso. Se puede observar que en las muestras de suelo contaminado donde se saturó con agua destilada la resistividad es menor a comparación de las muestras de suelo saturadas con agua residual.

RESULTADOS MUESTRAS DE AGUA CONTAMINADA (100 ml)

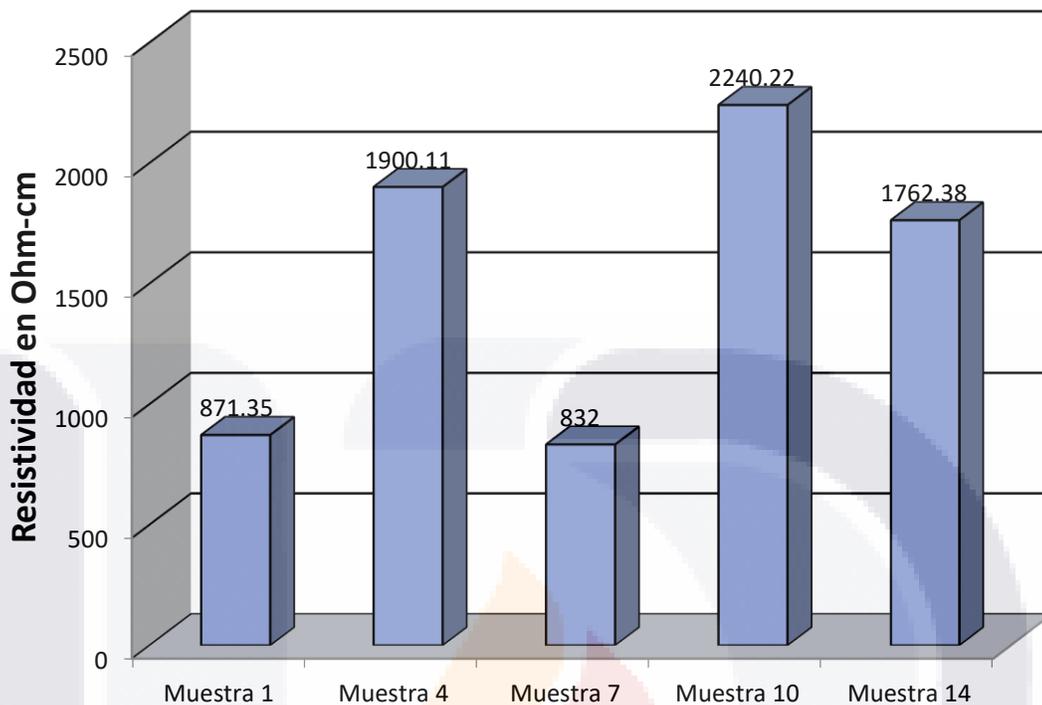


Figura 5.12. Resultados de resistividad. Muestras de suelo saturadas con 100ml

Tabla 5.2.- muestra los resultados de las resistividades calculadas para muestras con 100ml.

MUESTRA	TIPO DE MUESTRA	CANTIDAD DE AGUA	CONTENIDO	RESULTADO
1	Contaminada	100 ml	Agua Destilada	871.35 Ohm-cm
4	No contaminada	100 ml	Agua Contaminada	1900.11 Ohm-cm
7	Contaminada	100 ml	Agua contaminada	832 Ohm-cm
10	No Contaminada	100 ml	Agua destilada	2240.22 Ohm-cm
13	Solo Agua Destilada	250 ml		235852.32 Ohm-cm
14	Solo Agua Contaminada	250 ml		1762.38 Ohm-cm

RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS

En la tabla 5.3 se puede observar los resultados de la prueba de laboratorio para el sitio 1.

Tabla 5.3.- muestra los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio para el sitio 1

Profundidad de la muestra	Relación de vacíos	Porosidad	Porcentaje de humedad	Resistividad ohms - m	Conductividad hidraulica(K)
4 m	1.33%	57%	27.6%	9-12	5.98-05 m/seg

En la siguiente grafica podemos ver los datos obtenidos mediante el sistema de clasificación de suelos para esta misma muestra.

Tabla 5.4. Análisis granulométrico por mallas según S.U.C.S.

	MALLA No	ABERTURA mm.	PESO RETENIDO	% RETENIDO PARCIAL	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA
ARENAS	2	50	0	0	0	100
	1 1/2	37.5	0	0	0	100
	1	25	0	0	0	100
	3/4	19	0	0	0	100
	0.5	12.5	45.4	3.66	3.66	96.34
	3/8	9.5	10.41	0.84	4.5	95.5
	4	4.75	209.27	16.86	21.36	78.64
GRAVAS	10	2	349.93	28.19	49.55	50.45
	20	0.85	294.95	23.76	73.31	26.69
	40	0.425	247.37	19.93	93.24	6.76
	60	0.25	77.7	6.26	99.5	0.5
	100	0.15	4.35	0.35	99.85	0.15
	200	0.075	1.5	0.12	99.97	0.03
	CH			0.4	0.03	100
	SUMA		1241.28			

GRANULOMETRÍA

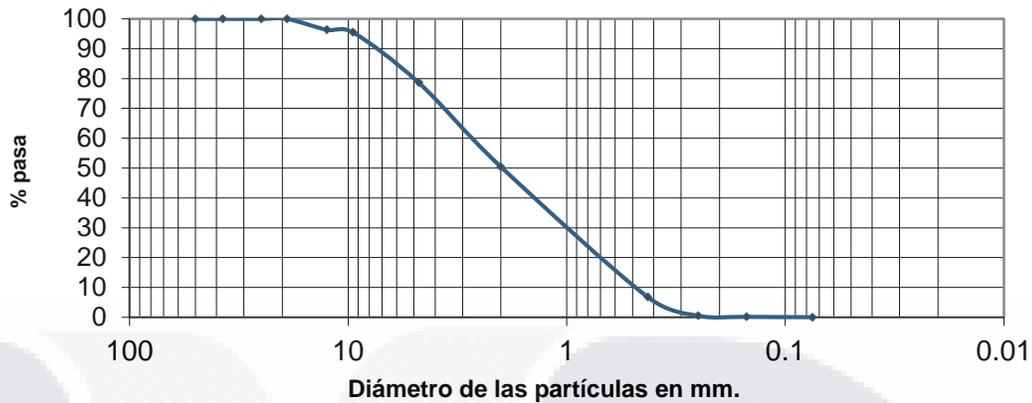


Figura 5.2.-. Curva granulométrica del suelo según S.U.C.S.

Valores calculados de diámetros D60, D30, D10, Coeficiente de uniformidad y Coeficiente de curvatura. Los resultados indican que se trata de arena bien graduada, el Cu (coeficiente de uniformidad) determina que tan uniforme son los granos. El Cc nos indica el equilibrio que existe entre los rangos de las partículas. Además los parámetros D60, D30, y D10 indican: diámetro máximo de partículas en la fracción que contiene el 60% más finos del suelo, diámetro máximo de partículas en la fracción que contiene el 30% más fino del suelo y diámetro máximo de partículas en la fracción que contiene el 10% más fino del suelo, respectivamente ver tabla 5.5.

Tabla 5.5.-. Coeficiente de uniformidad y Coeficiente de curvatura.

D60	2.8
D30	1
D10	0.5
Cu	5.600
Cc	0.714



CAPÍTULO

VI

DISCUSION DE RESULTADOS

CAPITULO VI: DISCUSION DE RESULTADOS.

MEDICIONES GEOFISICAS

A continuación, se discuten los resultados de esta investigación, los cuales, incluyen interpretaciones de los perfiles obtenidos de las pruebas geofísicas, de las pruebas de laboratorio y de la técnica de box-soil.

PRUEBAS DE COMPARACION:

Los resultados muestran que el arreglo dipolo-dipolo (primer metodo) (Figura 5.3 inciso b)) no presenta anomalías asociadas con el fracturamiento, pero muestran el paquete de estratos bien definidos de acuerdo a los contrastes de resistividad obtenidos. Por su parte, los resultados de la técnica *Wenner* (segundo metodo) y *Schlumberguer* muestran anomalías asociadas con el fracturamiento (Figura 5.3, inciso c) y d)). A pesar de los indicadores que muestran los resultados de las dos técnicas anteriores, la configuración *Schlumberguer* (Figura 5.3 inciso a)) resultó ser la más eficiente para caracterizar cambios de resistividad lateral, la cual muestra que existe un flujo descendiente de agua a través del fracturamiento, siguiendo el plano de falla. Los tres métodos (*Wenner*, *Schlumberguer* y Dipolo-dipolo) muestran que a partir de los 4 metros la resistividad decrece, lo que sugiere que el material a esta profundidad se encuentra posiblemente saturado por infiltraciones. Según los resultados del método *Schlumberguer* (tercer método) en la figura 5.3 inciso a) se observa que existen grandes anomalías de baja resistividad, siguiendo un patrón horizontal a partir de los 5 m hasta los 20 m aproximadamente, con un rango de valores que van desde 1.2 a 12 ohm-m, estos valores de resistividad se pudieran asociar a material hidrofílico como arcilla, si

consideramos que este tipo de suelo puede presentar valores de resistividad de 1 a 100 ohm-m (Perez-Garcia *et al.* 2010).

COMPARACION DE PERFILES CON FILTRACION Y SIN FILTRACION.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los sitios en donde se aprecia evidencia de infiltración son: el uno y el tres. En el sitio uno se observa además una discontinuidad en el estrato superior donde se observan además áreas con color (figura 6.1 inciso c y d) verde, las cuales corresponden a valores de baja resistividad de 5 a 9 ohms-m, asociada con humedad o algún tipo de relleno pudiera ser antropogénico. En el sitio número tres no se observa discontinuidad en el terreno, tal vez porque la medición se hizo en época de lluvias lo que implica que el terreno contiene mayor humedad que la temporada de estiaje. Por otro lado, se aprecian dos anomalías de baja resistividad de color azul (figura 6.1 inciso b) con valores de 1.2 a 2.8 ohms-m, posiblemente asociadas a un flujo vertical, zona potencial de infiltración el agua al subsuelo.

Los perfiles donde no se observa infiltración corresponden a los sitios: el dos, cuatro y cinco. En estos perfiles se observan grandes anomalías de baja resistividad a profundidades mayores de 4 m (figura 6.1 incisos b, b y b), y con valores de resistividad que varían desde 1.2 hasta 9 ohms-m.

Se puede decir que en los lugares con infiltración, el flujo es vertical los primeros 6 m y que después de esta profundidad, el flujo se vuelve horizontal. Por otro lado, en los lugares donde no hay aparente infiltración el flujo es mayormente horizontal.

La tabla 5.5 resume las principales características de los perfiles en sus respectivos sitios de medición. Se destacan las principales diferencias entre ellos con base sobre todo a la humedad y posible filtración.

RESULTADOS DE LA PRUEBA BOX-SOIL

En los resultados de la prueba de box-soil se observa que las resistividades mayores (1900.11 y 2240.22 ohm-cm) se presentaron en las muestras que contienen mayor cantidad de agua contaminada y suelo no expuesto a contaminación, por lo que se puede asumir que las sustancias presentes en el agua contaminada permiten que el suelo sea más resistivo. Con respecto a las muestras de suelo contaminado y agua destilada agregada (871.35 y 832 ohm-cm), se observa un decaimiento en la resistividad, lo que sugiere que las sustancias presentes en el suelo permiten el paso de la corriente eléctrica más fácilmente. No se conoce que tipo de sustancias están contenidas en las muestras de agua residual utilizada en las pruebas de laboratorio ya que no se realizó el análisis pertinente.

RELACIONES VOLUMETRICAS Y GRAVIMETRICAS

Se puede observar que la muestra inalterada extraída en el sitio uno a 4m de profundidad, se clasifica como arena bien graduada con valores de resistividad de 9-12 ohms-m, con un porcentaje de humedad de 27.6 %, porosidad de 0.57 %, relación de vacíos de 1.33 % y conductividad hidráulica de 5.98×10^{-5} m/seg. El valor de conductividad hidráulica obtenido en laboratorio equivale a un volumen de 62 mililitros que se está infiltrando a través de un conducto de un centímetro cuadrado de sección transversal cada segundo.



CAPÍTULO

VII

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS.

A continuación, se muestran las conclusiones generales de esta investigación, así como conclusiones particulares y finalmente nichos de investigación.

Se utilizaron en total tres configuraciones *Shclumberguer*, *Wenner* y dipolo-dipolo sin embargo con la configuración *Shclumberguer* es la que arroja los resultados más útiles para esta investigación de tal modo que los perfiles de tomografía eléctrica resistiva con la configuración *Shclumberguer*, existen zonas de baja resistividad asociadas a humedad y que empatan con las fallas en todos los casos (ver perfiles con mayor resolución). En los perfiles de las figuras 5.3 a), 5.5 a) y 5.9 a) se aprecia una zona a los 10 m de profundidad en los tres perfiles con anomalías de baja resistividad de color azul con valores de resistividad que van de los 1.2 a 3.8 ohms-m. En los perfiles con mayor resolución se observan grandes manchas azules lo que representan anomalías resistivas, dichas anomalías se asocian con flujo vertical. Después en los perfiles con menor resolución se observan manchas azules de forma alargada, lo que sugiere flujo horizontal de agua (figuras 5.3, 5.5, 5.9 y 5.11 incisos a)), por lo que podemos asumir que el agua residual utiliza los planos de las fallas para infiltrarse al subsuelo, esto representa un peligro para la sociedad y un daño al medio ambiente. Debajo de la zona con anomalías resistivas de forma alargada en estas mismas figuras se pueden observar zonas muy resistivas de colores naranjas y amarillas. Lo que sugiere la existencia de material muy consolidado y seco.

Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio se observa que existe una relación inversa entre valores de resistividad y porosidad: si la matriz de suelo es muy porosa, la resistividad es baja; si el suelo es de porosidad baja, la resistividad aumenta. Con base en los resultados de la

técnica de box-soil podemos concluir que la presencia de contaminación por agua residual en las muestras de suelo tiene como efecto mayor conductividad eléctrica cuando la muestra se saturo con agua destilada, por el contrario, cuando la muestra se saturo con agua residual la conductividad bajó. El motivo por el cual la resistividad baja en muestras de suelo contaminadas es la presencia de material biológico y/o la presencia de sustancias químicas contenidas en el agua contaminada lo que facilita la conducción de la corriente eléctrica a través del suelo.

CONCLUSIONES PARTICULARES

En este apartado se mostrarán conclusiones particulares para cada parte de la investigación como por ejemplo conclusiones del trabajo de campo, en laboratorio y box-soil.

A) La resistividad eléctrica es una herramienta eficaz para determinar si existe infiltración al subsuelo. La comparación que se hizo entre las configuraciones Schumberguer, dipolo-dipolo y Wenner arrojó que el arreglo más sensible para determinar cambios laterales de resistividad fue el arreglo Schumberguer.

B) Con base en los resultados de las pruebas de laboratorio efectuadas a las muestras inalteradas extraídas en Jesús María (sitio 1) podemos concluir que el material se clasifica como arena bien graduada, lo que podría favorecer velocidades medias durante la infiltración (en el orden de 10^{-5} m/segundo). Esto implica que el terreno en el que recolectaron las muestras, puede permitir el paso de agua hacia el subsuelo a una velocidad de 62.81 mililitros por segundo en un área de un cm^2 .

Tabla 5.5.- Tabla conclusiva. muestra resumen de los resultados obtenidos y su comparación.

SITIO	CARACTERISTICAS GENERALES			RELACIONES VOL. Y GRAVIMETRICAS			observaciones
	Dipolo-dipolo	Schlumberger	Wenner	s	w (%)		
Av. Siglo XXI	excelente contraste entre los estratos, presenta discontinuidades y anomalías de baja resistividad.	presenta discontinuidades en estrato superior, también se observan anomalías de baja resistividad describiendo un patron horizontal a los 10m de profundiad aprox.	presenta discontinuidades del estrato superior, y anomalías de baja resisitividad con valores de resistividad del orden de 7 a 9 ohms-m,	0.57	5.98 x10 E -5	27.6	
Paso Blanco	excelente contraste entre los estratos, se observa discontinuidades ennel estrato superior, anomalías de baja resistividad	buen contraste entre estratos, En ella se observa una gran mancha de color azul que indica la presencia de anomalías de baja resistividad posiblemente asociadas a humedad					no se determinaron los parametros faltantes debido al factor tiempo
Av. Fundicion	no muestra estratos, solo una gran anomalía de baja resistividad posiblemente debido a rellenos no consolidados	buen constantes entre estratos también se puede ver anomalías de baja resistividad embebidas en un área más extensa y con resistividad mas homogénea					el sitio no conto con las condiciones fisicas necesarias para extraer muestras para determinacion de relaciones volumetricas y gravimetricas
Av. Universidad	se observa un paquete de estratos pobremente definido ósea que no existe mucho contraste, se observan tambien discontinuidades en el estrato superior	vemos los estratos un poco más definidos con más contraste entre ellos, se aprecia un área con anomalías con baja resistividad, lo cual indica una gran concentraciones humedad					el sitio no conto con las condiciones fisicas necesarias para extraer muestras para determinacion de relaciones volumetricas y gravimetricas
Av. Guadalupe Glez	no hay definicion de estratos, pero se aprecia material consolidado o impermeable discontinuo	podemos observar lo que parece ser rellenos ya que no tiene un paquete de estratos definido,					el sitio no conto con las condiciones fisicas necesarias para extraer muestras para determinacion de relaciones volumetricas y gravimetricas

C) Con base en los resultados se propone la siguiente metodología para determinar daños al medio ambiente por medio de fallas que afectan tuberías de drenaje y cuya esquematización se presenta en la figura 7.1

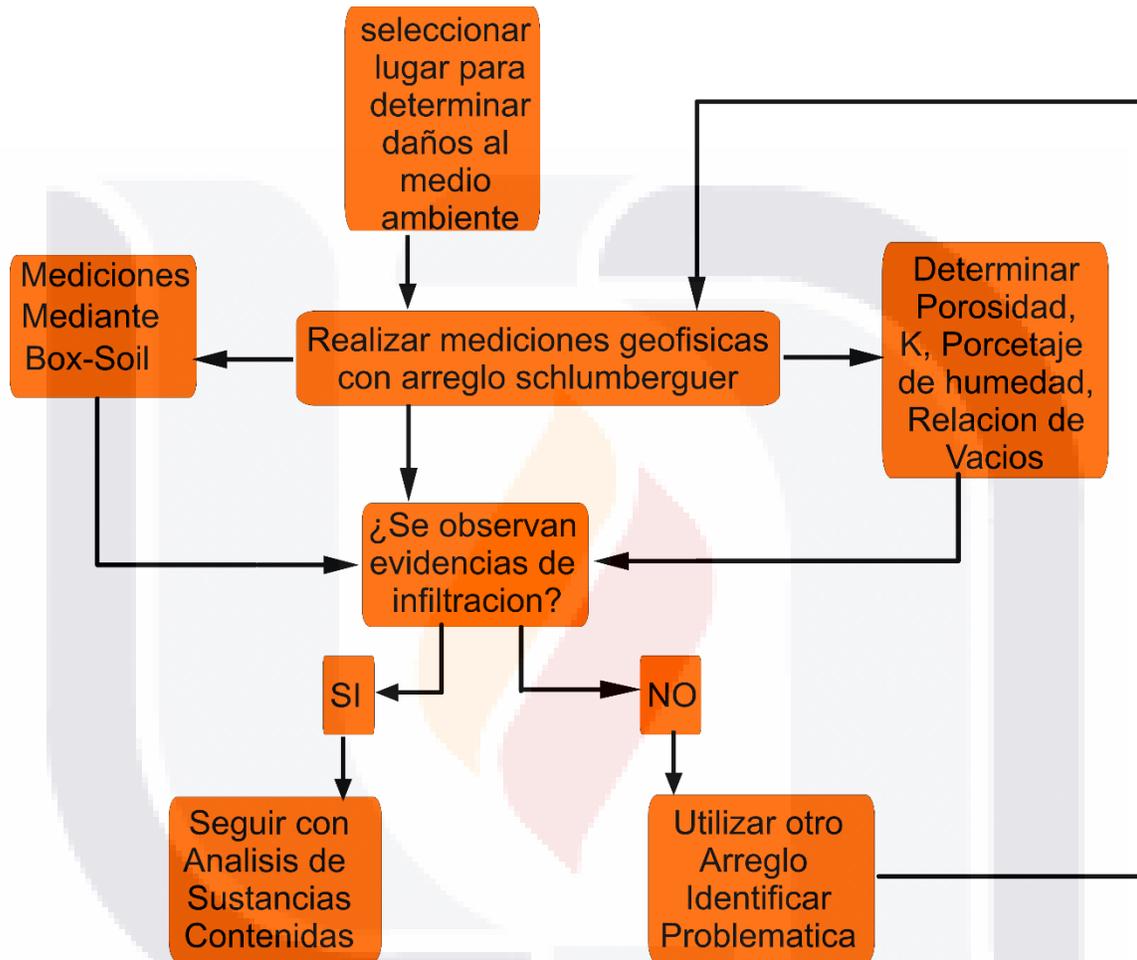


Figura 7.1. Metodología propuesta para determinar daños al medio ambiente.

NICHOS DE INVESTIGACION.

Para futuros trabajos de investigación o bien para ampliar este trabajo se propone lo siguiente:

- Conocer las características de la velocidad y dirección de infiltración, así como el nivel de degradación de las sustancias contenidas.
- Se determinaron en esta investigación los siguientes parámetros: porosidad, porcentaje de humedad, conductividad hidráulica y porcentaje de vacíos en dos de los cinco lugares estudiados, se recomienda determinar esos parámetros en los tres lugares restantes: Esto podría contribuir en la generación de un mapa de vulnerabilidad en Jesús María.
- Investigar sobre la trayectoria del agua contaminada en el subsuelo con sustancias químicas o radioactivas.
- Identificar en que zonas de la mancha urbana en las que se concentran más los contaminantes.

BIBLIOGRAFÍA

- Abu-Hassanein, Z. S., Benson, C. H., and Blotz, L. R. (1996). "Electrical Resistivity of Compacted Clays." *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(5), 397–406.
- Aranda-Gomez, jose-jorge. (1989). "Geología preliminar del Graben de Aguascalientes."
- Archie, G. E. (1942). "The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics." *Transactions of the AIME*, 146(01), 54–62.
- Aizebeokhai Ahzegbobor Philips, "2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design"(2010)
- Castellazzi, P., Arroyo-Domínguez, N., Martel, R., Calderhead, A. I., Normand, J. C. L., Gárfias, J., and Rivera, A. (2016). "Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 102–111.
- Environmental Protection, A. (1980). "Wastewater treatment and disposal systems.pdf."
- Filer, V., and Statescu, F. (2016). "Considerations on Methods used for Determination the Hydraulic Conductivity of Soil." *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Sectia Constructii, Arhitectura*, 62(1), 73.
- Gabriels, D., Lobo, D., and Pulido, M. (2011). "Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos." *Venesuelos*, 14(1), 7–22.
- García-Cortés, A., and Rodríguez, R. (2006). *Los residuos minero-metalúrgicos en el medio ambiente*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Gastelum Contreras, A., Espinoza Ortiz, M., Peinado-Guevara, H., Delgado-Rodríguez, O., Ladrón de Guevara, M., and Peinado-Guevara, V. (2017). "Using Electrical Profiling to Determine Soil Petrophysical Parameters in an Agricultural Field." *Polish Journal of Environmental Studies*, 26(3), 1077–1087.
- Hasanuddin, Abidin, Andreas Espinoza, Gumilar Irwan "Land subsidence of Jakarta (Indonesia) and its relation with urban development"(2015)
- Lo, W.-C., Chao, N.-C., Chen, C.-H., and Lee, J.-W. (2017). "Poroelastic theory of consolidation in unsaturated soils incorporating gravitational body forces." *Advances in Water Resources*.
- Meju, Maxwell A., 2002, Geoelectromagnetic exploration for natural resources: Models, case studies and challenges, *Surveys in Geophysics* 23: 133-205
- Orellana, E. 1982. *Prospección geoelectrica en corriente continua*. Segunda edición corregida y ampliada, Ed. Paraninfo, Madrid. pp 579.

- Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortíz-Lozano, J. Á., Zermeño-De-Leon, M. E., and Solís-Pinto, A. (2013). "Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México." *Engineering Geology*, 164, 172–186.
- Perez-García, N., Garnica-Anguas, P., Delgado, V.-H., and Landaverde, N. (2010). "Evaluacion de la resisitividad en campo y en laboratorio y su aplicacion a pavimentos.pdf." (Publicación Técnica No. 325).
- Qazi, W. H., Bin, S. B. A., Osman, S., and Memon, M. B. (2016). "Prediction of soil engineering properties using electrical resistivity values at controlled moisture content-a conceptual paper." 11(6), 6.
- Richards L.A., "Capillary conduction of liquids in porous mediums. Physics 1."(1931)
- Saffih-Hdadi, K., Défossez, P., Richard, G., Cui, Y.-J., Tang, A.-M., and Chaplain, V. (2009). "A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density." *Soil and Tillage Research*, 105(1), 96–103.
- Slater, L. (2007). "Near Surface Electrical Characterization of Hydraulic Conductivity: From Petrophysical Properties to Aquifer Geometries—A Review." *Surveys in Geophysics*, 28(2–3), 169–197.
- UAQ-UNAM. (2002). .
- UNAM-UAQ. (2009). *Estudio integral sobre la problemática del agua, subsidencia y sismicidad en el valle de Aguascalientes*. UNAM-UAQ.