



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA  
TIERRA

ANÁLISIS DE LA FORMACIÓN DEL FALLAMIENTO POR  
SUBSIDENCIA EN LA ZONA DE IRAPUATO, GTO.

## T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
(MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA)

**PRESENTA:**

ING. AARÓN ANTONIO SCHROEDER AGUIRRE

**Jurado examinador:**

Dr. Ramiro Rodríguez Castillo (Director de tesis)

Dra. Graciela Herrera Zamarrón (Presidente)

Dra. Dora Celia Carreón Freyre (Vocal)

Dr. Eleazar Arreygue Rocha (Suplente)

Dr. Oscar Escolero Fuentes (Suplente)

MÉXICO D.F.

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres Aarón Mario Schroeder Rodríguez y María teresa Aguirre Torres por haberme alentado a superarme todos los días, enfundándome ética y disciplina e todos los proyectos que hasta el día de hoy me he puesto sin dudar un solo momento en las capacidades que me han enseñado desde pequeño.

A mis hermanos Gerardo Federico Schroeder Aguirre y Reinhard Schroeder Román que las metas impuestas y el coraje para alcanzarlas siempre termina con una gran recompensa.

A mis compañeros y amigos del trabajo de la Facultad de Ingeniería, al Instituto de Geofísica y Geología que estuvieron conmigo en este proyecto y seguramente seguirán estando en los siguientes proyectos, apoyándome técnica y moralmente.

A mi familia, que en fechas recientes, me demostraron que a pesar de la distancia si es posible estar juntos y convivir en paz, además de tener la tranquilidad de que están ahí y siempre podré contar con ellos.

A mi tutor Dr. Ramiro Rodríguez Castillo por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y dándome la asesoría técnica y científica en las áreas de Ciencias de la Tierra.

Al comité tutorial Dra. Graciela Herrera Zamarrón, Dra. Dora Celia Carreón Freyre, Dr. Eleazar Arreygue Rocha), Dr. Oscar Escolero Fuentes por tomarse en tiempo y la dedicación en la revisión de este trabajo enriqueciéndolo con sus conocimientos.

A los todos y cada uno de los miembros de la familia Rubio Ayala por apoyarme al igual que todos los mencionados anteriormente en este proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de ser mi casa de estudio, así como al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al CONACYT por haberme apoyado de manera económica para poder obtener el grado de maestro y la experiencia científica, técnica y cultural.

# ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	OBJETIVOS.....	5
1.2	HIPÓTESIS.....	5
1.3	METODOLOGÍA A EMPLEAR .....	5
1.4	PLAN DE TRABAJO A DESARROLLAR .....	6
1.5	ANTECEDENTES.....	6
2	ÁREA DE ESTUDIO .....	9
2.1	LOCALIZACIÓN.....	9
2.2	CLIMA.....	11
2.3	FISIOGRAFÍA .....	12
2.4	GEOMORFOLOGÍA.....	15
2.5	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.....	17
2.6	GEOLOGÍA HISTÓRICA .....	20
2.7	ESTRATIGRAFÍA .....	21
2.8	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	27
2.9	HIDROLOGÍA SUPERFICIAL.....	28
2.10	AGUA SUBTERRÁNEA.....	29
2.11	SISTEMA ACUÍFERO LOCAL.....	30
3	SUBSIDENCIA.....	33
3.1	ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA SUBSIDENCIA .....	51
3.2	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN PROBLEMAS DE SUBSIDENCIA.....	56
3.3	DISCUSIÓN Y COMENTARIOS.....	57
4	METODOLOGÍA .....	59
4.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN .....	59
4.2	VERIFICACIÓN GEOLOGICA.....	60

## ÍNDICE GENERAL

4.3	MAPEO DE FALLAS.....	61
4.4	CARTOGRAFÍA.....	61
4.5	IDENTIFICACIÓN DE FAMILIAS DE FALLAMIENTO Y PROCESOS ASOCIADOS.....	62
5	RESULTADOS.....	63
6	DISCUSIÓN.....	81
7	CONCLUSIONES.....	89
8	REFERENCIAS.....	94

## ÍNDICE DE FIGURASY TABLAS

Figura 2.1. Localización de la zona de estudio.	11
Figura 2.2. Distribución de climas en el estado de Guanajuato,	12
Figura 2.3. Provincias Fisiográficas del estado de Guanajuato,	13
Figura 2.4. Distribución geológica superficial de la zona de Irapuato.	19
Figura 2.5. Columna estratigráfica de la zona de estudio.	24
Figura 3.1. Mecanismo generador del fracturamiento según Jaches y Holzer (1982), donde H es el espesor del material antes de ser deformado, las flechas indican el desplazamiento de este y como se comporta el material ante la protuberancia del lecho rocoso.	39
Figura 3.2. Mecanismo de generación de fracturas formado por las irregularidades en espesores.	39
Figura 3.3. El fracturamiento como resultado de la transferencia de esfuerzos cortantes entre las interfases de los estratos Sheng y Helms (1995).	40
Figura 3.4. Fracturamiento controlado por una falla preexistente, se crean fracturamientos sobre la traza de la falla, Sheng y Helm (1995)	41
Figura 3.5. Formación de fallamiento a profundidad debido a heterogeneidades en el material y/o cambios bruscos de espesor dentro del acuífero, Sheng y Helm (1995).	41
Figura 3.6. Esquema de generación rápida de fallamiento y fracturamiento después de una precipitación abundante, adaptado de Carpenter (1999).	42
Figura 3.7. Escenario donde se pueden generar fallamientos según Burbey (2000).	43
Figura 3.8. Ancho de influencia de fallamiento adaptado de Reisbeck y Pedler (1985).	43
Figura 3.9. Mecanismo de formación de fracturas propuesto para las condiciones del valle de Querétaro. Adaptado de Trejo-Moedano y Martínez-Baini (1991).	44
Figura 3.10. Mecanismo de Generación de fallamientos adaptado de Álvarez-Manilla (1999).	45
Figura 3.11. Ilustración que muestra el mecanismo de formación de fisuras de tierra.	47
Figura 3.12. Localización y sección E-W de fallas en el Valle de Las Vegas, Nevada EU.	49
Figura 3.13. Localización de las fallas en la ciudad de Morelia, Michoacán.	50
Figura 3.14. Esquema del principio de esfuerzo efectivo de Terzaghi, (Galloway et. al., 1999)	54
Figura 3.15. Principio de esfuerzo efectivo, donde $\sigma_T$ es el esfuerzo total, $P_p$ es la presión de poro y $\sigma_e$ es el esfuerzo efectivo.	55

## ÍNDICE DE FIGURASY TABLAS

Figura 5.1. Secciones geológicas esquemática A-A'-A", B-B' y C-C' vista en planta.	64
Figura 5.2. Sección geológica esquemática A-A'-A" vista de perfil.	65
Figura 5.3. Sección geológica esquemática B-B' vista de perfil.	66
Figura 5.4. Sección geológica esquemática C-C' vista de perfil.	67
Figura 5.5. Distribución de los sistemas de fallas en la ciudad de Irapuato, Guanajuato.	72
Figura 5.6. Regímenes de extracción en la ciudad de Irapuato. Millones de metros cúbicos Mm <sup>3</sup> .	73
Figura 5.7. Configuración de nivel estático para el año de 2003 en la ciudad de Irapuato.	74
Figura 5.8. Configuración de nivel estático para 2005 en la ciudad de Irapuato.	75
Figura 5.9. Distribución de la profundidad de pozos dentro de la zona urbana de Irapuato.	76
Figura 5.10. Distribución de anomalías magnéticas asociadas a la distribución de materiales arcillosos en la zona urbana.	77
Figura 5.11. Formación de fallas del sistema Jacarandas/San Gabriel, Colonia La Hacienda y Pradera debido cambios a bruscos de espesor dentro del acuífero, Sheng y Helm (1995).	79
Figura 5.12. Mecanismo de generación de fallamientos en la parte central adaptado de Álvarez-Manilla (1999), a causa de cono de abatimiento.	80
Figura 6.1. Mecanismo de generación de fracturas formado por las irregularidades en espesores.	85
Figura 6.2. Formación de fallamiento debido a cambios bruscos de espesor dentro del acuífero, Sheng y Helm (1995).	86
Figura 6.3. Mecanismo de generación de fallamientos en la parte central adaptado de Álvarez-Manilla (1999), a causa de cono de abatimiento.	87
Figura 7.1. Sistema de Falla de Juan Escutia y Falla de Puente de Guadalupe.	89

## ÍNDICE DE FIGURASY TABLAS

Tabla 2.1. Medidas de la deformación de diferentes capas en el centro de Shanghai	36
Tabla 5.1. Distribución de las fallas dentro de la zona urbana de la ciudad de Irapuato.	69

## RESUMEN

La región de estudio, Irapuato Guanajuato, se encuentra comprendida en el límite de dos provincias geológicas: la Provincia de la Sierra Madre Occidental (SMO) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Predominan rocas volcánicas en ambas zonas.

La ciudad de Irapuato presenta problemas de hundimientos en el terreno (subsistencia) que se manifiestan por fracturamientos en la superficie del terreno y hundimientos. La subsistencia se asocia a los intensos regímenes de extracción de los más de 1,600 pozos activos de la zona. En Irapuato se localizaron y geoposicionaron 15 sistemas de fallas con una longitud total acumulada de 21.23 km. Las velocidades de subsistencia medida son de 1-2.5 cm/año y 6-7 cm/año.

Para el análisis de los sistemas de fallas se colocaron en un sistema de Información Geográfico (SIG). La orientación preferencial de las fallas es NE-SW, lo que lleva a postular la hipótesis de la existencia de un control tectónico estructural en la zona de estudio que determino la geometría de los depósitos lacustres dentro de la cuenca.

La causa principal de la subsistencia es el intenso régimen de extracción de agua de pozos agrícolas localizados en la mancha urbana. Se proponen algunas hipótesis sobre la geometría y orientación de las fallas en Irapuato. La principal es que la geometría de los sistemas está relacionada más con un paquete somero de arcillas lacustres y otros depósitos de materiales deformables de la zona que con control tectónico de grandes estructuras.

Se ha elaborado la cartografía geológica y perfiles de la región para conocer de manera específica, la relación que guardan los depósitos Cuaternarios que se encuentran dentro de la cuenca, el espesor de las capas arcillosas, los patrones de depósito en la zona de estudio con el proceso de subsistencia. También se analizaron los regímenes de explotación de agua subterránea y la profundidad de pozos dentro de la cuenca.

## RESUMEN

Para el análisis de los abatimientos en la zona se realizaron las configuraciones de los niveles estáticos para los años 2003 y 2005 donde se aprecia evolución de los niveles en esta zona con un promedio de 2 m.

Así mismo, en el análisis magnetométrico (SGM, 2005), se aprecia que las estructuras controlan el depósito de los materiales finos, por lo que se tiene una relación directa con la geometría de los depósitos lacustre y en consecuencia con los hundimientos del terreno.

## ABSTRACT

Irapuato Guanajuato, the study area, is located at the limits of two geologic provinces: The Sierra Madre Occidental and the Mexican Transvolcanic Belt (MTB). Volcanic rocks prevail in both areas.

The Irapuato urban area presents land subsidence problems, showing land fractures surface and collapses. Subsidence is associated to the intense extraction regimens of more than 1600 active wells within the area. There were located and georeferenced 15 fault systems with a total length of 21.23 km. The subsidence velocity ranging between 1-2.5 cm/year and 6-7 cm/year.

For its analysis, the faults were located in a Geographic Information System (GIS). The preferential orientation of the faults is NE-SW, which leads to propose the hypothesis of tectonic structural control in the area, determining the geometry of the lacustrine deposits within the basin.

The main reason of the subsidence is the intense abstraction of the agriculture wells located inside the urban zone. Some hypotheses are proposed about the faults' geometry and orientation in Irapuato. The main one is that the geometry of the fault systems is more related to a superficial layer of lacustrine clay and to other deformable material deposits in the area that tectonic control of large structures.

The geologic cartography and profiles of the region was done to find specifically the relation between the Quaternary deposits located inside the basin, the thickness of the clay layers, the deposit patterns in the area with the subsidence process. The extraction regimens and depth of wells within the basin were also analyzed.

For analysis the water table withdrawal, configurations of the static levels were realized for the years 2003 and 2005 where the evolution of the level seen in the area with an average of 2 m.

## ABSTRACT

Moreover, a magnetometric analysis was made (SGM, 2005), shows that the structures controlling the deposition fine materials, so it has a direct relationship with the geometry of the lacustrine deposits and consistent with the land subsidence.

La explotación excesiva de un acuífero en una cuenca sedimentaria compuesta por relleno granular con un potencial de consolidación elevado, tiene como consecuencia el hundimiento gradual del suelo. Este fenómeno es conocido como subsidencia por explotación de agua subterránea.

La magnitud de estos hundimientos puede ser de unos cuantos centímetros por año, sin embargo afecta grandes extensiones de superficie (del orden de kilómetros cuadrados), los cuales son imperceptibles pero al cabo de unos cuantos años generan problemas como cambios en el drenaje natural, o daños en infraestructura civil que va desde edificaciones, tuberías de agua potable, gas, etc.

Los hundimientos y fracturas que se presentan como consecuencia de la explotación excesiva de agua subterránea traen consigo problemas, no solo económicos por daños que causan directamente sobre la infraestructura urbana, sino también sociales y legales por el riesgo que conlleva habitar en una zona donde los hundimientos provocan cada vez más frecuentes inundaciones, y donde la aparición de una nueva grieta es latente.

Las condiciones geológicas de la zona y la ubicación son factores primordiales para poder determinar que tan graves y por lo tanto que magnitud tendrán las implicaciones sociales y económicas.

En el caso de la ciudad de Irapuato, la subsidencia ha llegado a tal grado que al día de hoy se tienen identificado 15 sistemas de fracturamientos a partir de la distribución de fracturas y espesores de material aluvial y lacustre el área que presenta problemas de subsidencia se estima en más de 100 km<sup>2</sup>.

La subsidencia o los hundimientos del terreno causados por la explotación excesiva de los sistemas acuíferos es un problema mundial en la agricultura

y en las áreas urbanas (Poland J. F., 1984); la subsidencia se presenta en algunas zonas de la República Mexicana, donde estos efectos están asociados con fallas estructurales, fisuras y fallas superficiales, debidas a consolidación diferencial vertical de depósitos plásticos como son depósitos lacustres o fluviolacustres, sobreyaciendo a las fallas regionales.

Las condiciones geológicas, climáticas e hidrogeológicas del Altiplano Mexicano propician que el agua subterránea sea la principal fuente de abastecimiento de agua para los sectores más demandantes: el agrícola, el urbano y el industrial. El mayor consumidor y demandante de agua en México es el sector agrícola, con más del 80 % del total del agua disponible. En los estados del centro norte del país, el número de pozos agrícolas supera hasta en dos órdenes de magnitud a los urbanos, lo que se traduce en los volúmenes extraídos. Ciudades como Irapuato en el estado de Guanajuato cuenta con 85 pozos urbanos, de los cuales 65 se encuentran activos, mientras que los pozos agrícolas en operación son más de 1000.

La recarga no es ni del mismo volumen que el del agua extraída ni se da en los rapidísimos tiempos en que se extrae el agua. El espesor de la zona saturada de los acuíferos explotados se ven entonces seriamente afectado.

La explotación acuífera, sin que necesariamente sea catalogada como “sobreexplotada” esto conlleva efectos colaterales adversos. La subsidencia, hundimientos diferenciales del terreno, que tienen que ver más con la presencia de acuitardos o con sistemas acuíferos en donde existen materiales deformables como grandes formaciones areno-arcillosas, que con la explotación excesiva, daña la infraestructura urbana y particularmente el patrimonio de la población afectada. Las velocidades de los hundimientos van de milímetros a varios centímetros por año y no son uniformes ni en tiempo ni en espacio.

La extracción induce a los acuitardos a despresurizarse y consolidarse, y así originando los hundimientos del terreno, proceso que va acompañado de la aparición en la superficie de fracturas. Ciudades como Querétaro, Morelia, Irapuato, Salamanca, Celaya, Abasolo, Silao, Aguascalientes y la misma Ciudad de México están siendo afectadas de maneras diferentes por hundimientos del terreno.

La subsidencia, las fallas o fracturas no están consideradas como un desastre natural y mucho menos que es inducido por la extracción del agua, por lo que no están consideradas dentro de la Ley de Aguas Nacionales, LAN ni en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, LGEEPA.

Las fallas provocadas por la subsidencia pueden facilitar la infiltración de agua de lluvia o de tuberías rotas, acarreando material fino, desestabilizando los terrenos y generando grandes oquedades. Eventos como algunos colapsos de terreno, se deben más a la infiltración que al hundimiento diferencial del terreno.

La aparición de fisuras en pisos o paredes debe tomarse por los especialistas y autoridades como una primera señal de alerta y no asociarlos solamente a problemas constructivos, como mala calidad de materiales o inestabilidades en los terrenos. El agrandamiento de estas fracturas y el incremento en la notoriedad de los desplazamientos verticales y horizontales no se asocia a un proceso continuo, sino relacionados con los regimientes de extracción.

En la ciudad de Irapuato, una de las ciudades más afectadas a nivel nacional, se han detectado 15 sistemas de fallas. Los desniveles del terreno en la mancha urbana rebasan localmente los dos metros. Se han

abandonado edificios construidos justo sobre las trazas de fallas, los hundimientos ponen en riesgo escuelas, comercios, edificios públicos, entre otros, afectando gravemente la economía local de la ciudad. Recientes estudios hidrogeológicos realizados por la UNAM (Rodríguez et. al., 2006) pueden ayudar a las autoridades a minimizar el impacto a la población.

Los hundimientos lentos deforman y rompen estructuras sólidas y rígidas de edificios, casas habitación, bardas, banquetas, daños que son asimilados principalmente por los afectados. Se desestabilizan paredes y pisos, y se llegan a colapsar los techos de las viviendas. Los afectados realizan continuas y costosas reparaciones, sin consultar a las autoridades respectivas, las cuales no dimensionan claramente la magnitud del problema, sin saber que el proceso no se puede detener. El precio de los terrenos se deprecia de una manera considerable. La pérdida del patrimonio afecta la calidad de vida de la población y de su descendencia. No existe manera de regular y/o controlarla compra/venta de terrenos o construcciones afectados por subsidencia.

Un problema que enfrentan autoridades en las ciudades asentadas sobre las zonas afectadas por subsidencia, es el de conocer los sitios afectados por fracturas para definir el crecimiento de la ciudad con el fin de evitar la construcción sobre la traza de estas. Cuando las fracturas ya se han desarrollado y son evidentes en superficie el problema se resuelve cartografiarlas y evitar construir sobre su traza.

Definir sitios donde se pueden generar fracturas por subsidencia en el futuro, ha sido estudiado por diversos autores (p.e. Holzer, 1980; Rojas et al., 2002). En la actualidad se reconoce que la principal línea de investigación en problemas de subsidencia es el estudio de la generación de fracturas con fin de predecirlos (Burbey, 2002).

## 1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de la formación y distribución de fracturas originadas por subsidencia debida a la sobreexplotación de acuíferos granulares interstratificados semiconfinados.

## 1.2 HIPÓTESIS

La distribución de los depósitos de materiales aluviales y lacustres dentro de la zona de estudio y el cambio abrupto en los espesores de dichos materiales, junto con la tendencia de algunos sistemas de fallas regionales, no necesariamente se encuentran relacionados con la dirección del fracturamiento dentro de la zona urbana por efecto sobre todo de la explotación de pozos agrícolas.

## 1.3 METODOLOGÍA A EMPLEAR

La recopilación y ordenamiento de la información fue pieza clave en el estudio y entendimiento del problema, por lo que se llevó a cabo los siguientes pasos:

- Concentrar información de trabajos previos que tratan del problema.
- Generar planos para ordenar y simplificar la información geológica, geofísica y geográfica de las fracturas existentes.

La descripción del fenómeno fue parte importante para poder desarrollar los modelos conceptuales propuestos en este trabajo, por lo que se procedió a:

- Medir los hundimientos relativos de las fracturas mediante mediciones topográficas.
- Cartografiar el fracturamiento existentes.

Entender el problema y revisar las teorías que involucran el estudio de este fenómeno sirvió para abordar el fenómeno de manera crítica, realizando la revisión de los principios físicos para poder evaluar la hipótesis acerca del origen y si es aplicable a las condiciones del suelo en el valle de Irapuato.

Para entender el comportamiento de la generación del fracturamiento se realizó el análisis de la subsidencia con la ayuda de modelos conceptuales integrando la información geológica de la zona y la cartografía de las fallas, así como su geometría y distribución, para poder dar una respuesta de cómo se dio el fenómeno en cada uno de los casos en particular.

#### 1.4 PLAN DE TRABAJO A DESARROLLAR

El trabajo presentado se desarrolló en las siguientes etapas:

- Recopilación, organización y estudio de información relacionada con el tema (Estado del arte).
- Recopilación y organización de información geológica, cartográfica, geofísica y litológica de Irapuato.
- Elaboración de modelos conceptuales de generación de fracturas.

#### 1.5 ANTECEDENTES

Desde principios del siglo pasado el planeta ha registrado un aumento un crecimiento acelerado en actividades referentes a la agricultura, ganadería y la industria, esto ocasionado por el incremento de la población. Las áreas agrícolas han sido invadidas por la urbana a causando que las zonas de uso agrícola han sido devorados por la mancha urbana, generando con esto una alza en la demanda del abastecimiento de agua potable para satisfacer las necesidades básicas de la población, industria y agrícola.

Las zonas con gran potencial para la extracción de agua subterránea son los valles formados por depósitos de materiales granulares, generalmente aluviales y lacustres, que en su conjunto forman el acuífero que es susceptible de ser explotado.

La explotación de agua subterránea en cuencas rellenas con depósitos aluviales y lacustres intercalados potencialmente consolidables, tiene como resultado la generación de asentamientos y la generación de fracturas.

Las fisuras, fracturamientos y fallas aparecieron en la ciudad de Irapuato a finales de los años 70's dentro de la mancha urbana. La manifestación más espectacular de este fenómeno y por lo mismo la más conocida por los habitantes fue la que se conoce con el nombre de Puente de Guadalupe, la cual se encuentra ubicada en el centro de la ciudad.

Se ha considerado a este fenómeno como un acontecimiento natural y sin tener estudios previos acerca de este tipo de manifestaciones se le han dado un origen tectónico y temporal. A pesar de la magnitud de los daños ocasionados por la subsidencia y la presión social ejercida a finales de los años 90's por un grupo de afectados sobre las autoridades, no se han desarrollado los estudios correspondientes para así clarificar el origen y mecanismo de la subsidencia, medir la evolución espacial y temporal de las mismas.

En esta zona se reconocen fracturas que tienen un movimiento relativo entre los dos bloques con una dirección paralela y predominante vertical al plano de fallamiento, por lo que, en superficie se alcanza a observar un escarpe de altura y longitud variable, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que existan fracturas con un desplazamiento predominantemente horizontal y normal al plano del fallamiento.

En 2006 el Instituto de Geofísica de la UNAM emprendió una investigación para evaluar el papel de las fallas por subsidencia en la alteración de la calidad del agua subterránea (Rodríguez et al, 2006). En dicha investigación se generó además un mapa de vulnerabilidad acuífera en el que se incorporaron las fallas. Este estudio forma parte de esta investigación.

Los primeros pobladores del municipio de Irapuato pertenecieron a un grupo étnico denominado Chichimeca (1200 D. C.), cuando esta etnia fue desplazada por los Tarascos que les imponen el nombre de Xiriuitzio o Iriquitzio, vocablo que los españoles conquistadores pronunciaban como “Jiricuicho”, por lo que después de algún tiempo los tarascos acabaron por nombrarle Jiricuato, cuyo significado es “lugar de habitaciones bajas”.

El origen de la ciudad se remonta a la Conquista española, aunque se desconoce la fecha exacta de los primeros asentamientos regulares, se presupone que esta fue a mediados del siglo XVI, entre los años 1556 y 1558, aunque se tienen registros de que esta ciudad fue fundada en el año de 1547 con el nombre de San Marcos Iricuato. Su nombre indígena original era Eraitzicutzio que es de origen tarasco y significa “lugar donde se ve la luna” según una referencial documental, “lugar pantanoso” según otra, “cerro que emerge de la llanura” según una tercera, y aun “lugar entre cerros” según otra.

Se dice que el lugar en donde ahora se encuentra la ciudad, fue una enorme laguna formada por las aguas de los ríos Guanajuato y Silao, haciéndolo imposible de habitar. Los primitivos pobladores del lugar, se establecieron en las orillas de las zonas inundables, como lo demuestran las ruinas arqueológicas encontradas en el Cerro de Arandas, Rancho Grande, en la Hacienda de la Virgen, en la Hacienda de la Sonaja, y en otros más (Sánchez y Eling, 2007).

## 2.1. LOCALIZACIÓN

El municipio de Irapuato se encuentra localizado en la parte central del Estado de Guanajuato, cuenta con una superficie de cerca de 800 km<sup>2</sup> y una

población de más de 440,000 habitantes a finales del 2000. La zona de estudio se encuentra localizada en la parte central del municipio de Irapuato; comprende una superficie aproximada de 225 km<sup>2</sup>, abarcando los municipios de Irapuato y parte de Salamanca.

Geográficamente el área se encuentra entre los paralelos 20°36'20.40" y 20°44'20.97" de latitud norte y entre los meridianos 101°15'17.34" y 101°24'2.80" al oeste de Greenwich con una altura promedio de 1,724 msnm y está localizada dentro de la Cuenca Hidrológica del Río Lerma–Salamanca, que corresponde a la región administrativa Lerma Santiago Pacifico (Figura 2.1).

Colinda al norte con los municipios de Silao, al noreste con el de Guanajuato, al este con el municipio de Salamanca, al sur con los municipios de Pueblo Nuevo y Abasolo y al oeste con el municipio de Romita. Las principales vías de comunicación son la carretera número 110 Pénjamo-San Luis de la Paz, la carretera número 45 que se comunica con León y El Estado de Querétaro, pasando por las ciudades de Salamanca y Celaya, la carretera número 84 que comunica con Cuerámara y la carretera estatal que comunica a Silao y Romita.

En el área se presentan problemas de contaminación entre cuyas fuentes potenciales destacan las aguas residuales, el fuerte incremento de los parques industriales y el consecuente incremento en la emisión de particulado, las actividades agrícolas de la región y el aporte de flujos termales. Por otro lado, la mayoría de las descargas provenientes de los sectores industrial, municipal y agropecuario, tienen como destino final el río Lerma y el acuífero subyacente (IMTA, 2003).

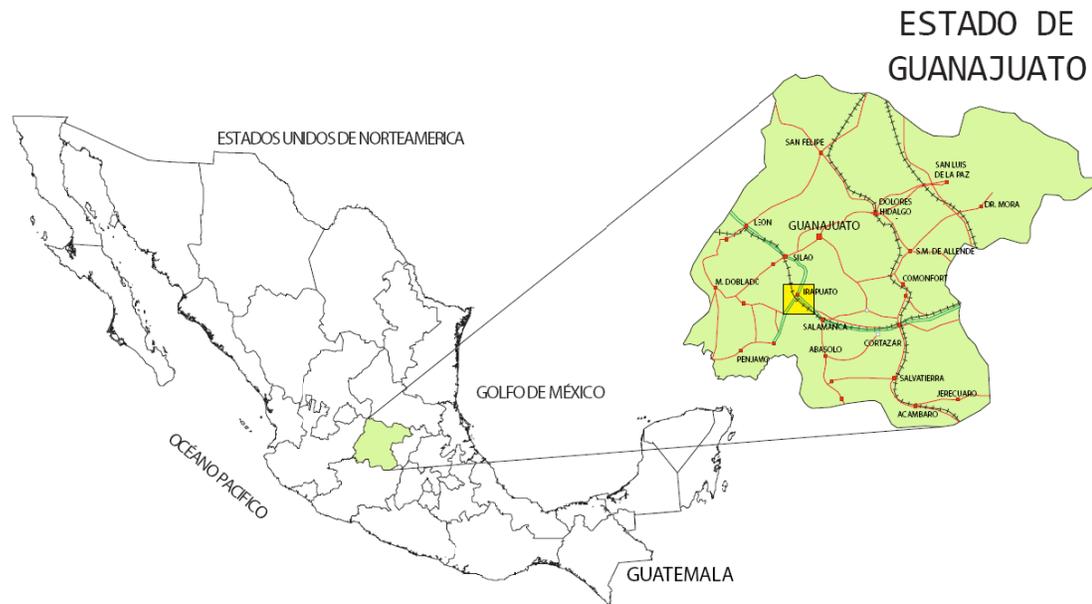


Figura 2.1. Localización de la zona de estudio.

## 2.2. CLIMA

El clima en dicha zona es semicálido, presenta lluvias en verano y una temperatura media anual mayor a 18°C, máximas anuales de 28°C y mínimas anuales de 10°C. Se trata de una región en la que las actividades económicas principales son la agricultura (Distrito de riego No.11) y la industria.

De acuerdo con la clasificación modificada de Köppen (1973) en el área de estudio se identifican varios climas que van desde semicálido–subhúmedo hasta semiseco–semicálido (Figura 2.2).

De acuerdo con los datos proporcionados en las estaciones meteorológicas de El Conejo e Irapuato (SMN) con claves 11134 y 11028, respectivamente; la clasificación que le corresponde a la ciudad de Irapuato consiste en un clima semicálido–subhúmedo con lluvias en verano (García, 1973). Los rangos de precipitación van de los 450 a 850 mm anuales, teniendo así una

precipitación media de 635 mm anuales; esta área tiene la característica de que presenta pequeñas cantidades de lluvia en invierno. La temperatura media del área es de 19°C, la temperatura en las partes altas de 16°C a 18°C y en las partes bajas de 29°C. La evaporación media anual por su parte es de 1,987 a 2,153 mm.



Figura 2.2. Distribución de climas en el estado de Guanajuato, (FUENTE: INEGI. Carta de Climas esc. 1:1'000,000).

### 2.3. FISIOGRAFÍA

De acuerdo con la clasificación de INEGI el área de estudio se localiza dentro de las provincias fisiográficas del Eje Neovolcánico junto con la Mesa Central que cubre una parte de la subprovincia de Sierras y Bajíos

Michoacanos y parte de la subprovincia del Bajío Guanajuatense (Figura 2.3). La subprovincia de Sierras y Bajíos Michoacanos se caracteriza por tener sierras con cráteres y llanuras de bajíos aislados; la subprovincia del Bajío Guanajuatense se caracteriza por la presencia de sierras de laderas tendidas, mesetas con cañadas, lomeríos aislados y llanuras de aluviones profundos. Las elevaciones del terreno en esta subprovincia oscilan entre 1,750 y 2,100 msnm (Morán et. al., 2004).



Figura 2.3. Provincias Fisiográficas del estado de Guanajuato,  
(FUENTE: INEGI, Mapa de provincias fisiográficas de Guanajuato esc. 1:1'000,000).

### Provincia del Eje Neovolcánico

Esta provincia cubre la mayor parte de la superficie de la zona de estudio, aproximadamente el 95%, y colinda al norte con la provincia Mesa Central. Dos de las cinco subprovincias que la conforman quedan representadas en el área de estudio: Bajío Guanajuatense y las Sierras y Bajíos Michoacanos.

La subprovincia del Bajío Guanajuatense se caracteriza por sierras de laderas tendidas, lomeríos aislados y comprende parte de los municipios de Irapuato, Pueblo Nuevo, Salamanca, Valle de Santiago y Villagrán. Las elevaciones presentes en esta subprovincia van desde los 1,720 msnm hasta 2,830 msnm (Cerro de Culiacán, ubicado al sureste de la zona de estudio). Los sistemas de topofomas que se encuentran en esta subprovincia son: llanuras de aluviones profundos, llanuras con tepetate, sierras de cumbres escarpadas, sierras de laderas tendidas, mesetas con lomeríos y lomeríos aislados. El origen de los suelos de esta área es de dos tipos: derivados de aluviones y los desarrollados a partir de la roca o material que los sustenta.

La subprovincia Sierras y Bajíos Michoacanos ocupa el segundo lugar dentro de la provincia, y forma parte de los municipios de Cortasar, Jaral del Progreso y Valle de Santiago. La subprovincia se caracteriza por tener sierras con cráteres y llanuras de bajíos; una gran sierra asociada con lomeríos y llanos que se extiende al suroeste del Valle de Santiago y un pequeño conjunto de cráteres.

#### Provincia de la Mesa Central

La provincia de la Mesa Central comprende la porción norte del estado y está limitada al sur por el Eje Neovolcánico y al oriente por la Sierra Madre Oriental. Está representada en la zona por la subprovincia Llanuras y Sierras del Norte de Guanajuato, con una superficie aproximada del 5%, esta porción

se caracteriza por tener sierras altas con mesetas laterales, vinculadas por la Sierra Madre.

La subprovincia de las Llanuras y Sierras del Norte de Guanajuato cubre parte de los municipios de Irapuato, Salamanca, Santa Cruz de Juventino Rosas, Dolores Hidalgo y Guanajuato, las elevaciones varían entre los 2,000 y 2,500 msnm. Además tiene una gran complejidad en su panorama fisiográfico, en el que concurren sistemas tan distintos entre sí como sierras, mesetas, lomeríos, valles y llanuras.

En términos generales, las llanuras y las mesetas de erosión quedan prácticamente al centro de la subprovincia; representan alrededor de un tercio de su área guanajuatense y se encuentran casi totalmente rodeadas por sierras, sierritas, mesetas lávicas y lomeríos asociados. Al complejo paisaje de la subprovincia subyace una litología igualmente complicada, constituida por varios tipos de roca volcánica con altos contenidos de sílice, basalto y rocas ígneas ácidas asociadas con aluviones antiguos (Morán et. al., 2004).

#### 2.4. GEOMORFOLOGÍA

La formación del relieve en el área de estudio ha sido generada por diferentes ciclos evolutivos, destacando en ellos el vulcanismo el cual es de cierta intensidad y la erosión, tanto eólica como hidráulica.

##### *Relieve endógeno*

*Relieve volcánico acumulativo.* Esta clase se enfoca a la descripción del relieve formado por el vulcanismo plio-Cuaternario, el cual por su relativa

juventud se encuentra muy poco alterado por los procesos exógenos; en el área existen los siguientes tipos:

Derrames y mesas de lava, son esencialmente basálticos al norte y basáltico-andesítico al sur. El grado de conservación de estas rocas es alto en tanto representa las fases más recientes del vulcanismo del centro de México. Ello se traduce en bajos valores de densidad y profundidad de la disección. En la parte sur de la zona de estudio se encuentra la mayor concentración de estructuras volcánicas monogenéticas cuyas erupciones han modificado la hidrología preexistente. En esta zona destacan cráteres de explosión (Maars), conocidos como Hoyas. Estos Maars y demás aparatos volcánicos se asientan sobre la planicie del Lerma con altitudes relativas de 500 a 700 m sobre la misma. Existe una gran extensión de lavas, algunas formando laderas radiales, con pendientes de 12° a 15°, también existen otras inclinaciones no más de 4° a 5°, tratándose de derrames extendidos sobre la planicie (Morán et. al., 2004).

#### *Relieve acumulativo*

Planicies y terrazas fluviales y lacustres no diferenciadas. Corresponde a la planicie regional conocida como el Bajío con latitudes de 1,700 a 2,000 msnm, se trata de acumulaciones de diversos materiales fluviales de granulometría fina (arena, limos, arcillas) y materiales piroclásticos (esencialmente cenizas) depositados en facies lacustres. Representan los depósitos de los antiguos lagos del Cuaternario originados en una época de balance hídrico favorable, que posteriormente fueron afectados por emanaciones volcánicas, cambios climáticos, y lentamente fueron desecándose y drenando hacia el oeste, a través del antiguo Lerma.

Estas planicies se originaron por la tectónica plio-Cuaternaria, también responsable del vulcanismo del Eje Neovolcánico.

Superficie de piedemonte esencialmente aluviales con disección débil, abarca abanicos aluviales cuaternarios, constituidos por conglomerados y areniscas, y en las partes frontales, más finos. Se presentan al pie de los conjuntos montañosos en contacto con la planicie de nivel de base sobre el cual se produce el “derrame” (Morán et. al., 2004).

## 2.5. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

Como se mencionó anteriormente la zona de Irapuato se encuentra mayoritariamente en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), esta es un arco volcánico que se desarrolló en el límite suroeste de la Placa de Norteamérica, este dio origen a la FVT la cual comenzó en la etapa final del periodo Oligoceno con derrames y grandes depósitos de material de composición ácida. En el periodo comprendido del Mioceno al Plioceno la actividad volcánica se mantiene con emisiones de material de composición intermedia–básica, la cual se le conoce en la región como Andesita La Ordeña la cual es agrupada en la secuencia volcánica del Mioceno tardío, la cual es considerada como la base de la FVT.

Por la cercanía con la provincia de la Mesa Central, las características de la FVT dentro de la zona de Irapuato difieren del resto, ya que se presentan extensas planicies rodeadas por edificios volcánicos, tanto en forma lávica como piroclástica y de composición que va de ácida a básica. Estas planicies obedecen a esfuerzos de tensión y compresión que dieron origen a un hundimiento de grandes bloques produciendo una fosa tectónica en la zona, que en la región forman cuencas cerradas y rodeadas por cerros, mesetas y

estructuras montañosas donde se aprecia un patrón de fracturamiento de las estructuras.

En los alrededores se observa un aspecto fisiográfico senil, en la parte central del valle los depósitos aluviales Cuaternarios rellenan la planicie, con espesores variables, que sobreyacen a un paquete de rocas ígneas, como producto de la desintegración de rocas madre que fueron arrastrados por agentes fluviales y eólicos.

En la zona de estudio existen afloramientos de todo tipo de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas; sus edades varían desde el Mesozoico hasta el Reciente. Las rocas más antiguas en la entidad, corresponden a las metamórficas del Triásico-Jurásico, sedimentarias del Cretácico y las que constituyen la mayoría de las rocas del estado, ígneas extrusivas del Cenozoico (Terciario y Cuaternario).

La zona de estudio se caracteriza por ser una fosa tectónica, en donde se depositaron diversos materiales ígneos y sedimentarios, producto de los eventos geológicos que han afectado a la zona central de México desde el Mesozoico hasta el presente.

Los controles estructurales y la distribución de las unidades geológicas, son gobernados por la actividad tectónica de la Placa del Pacífico, en colisión con la Placa de Norteamérica (IMTA, 2003).

En el área destacan dos conjuntos o dominios litológicos principales. El primero y más antiguo de ellos aflora a todo lo largo de la Sierra de Guanajuato y está constituido por un complejo plutónico y metasedimentario de edad Mesozoica. El segundo dominio está representado por rocas

volcánicas y sedimentos granulares del Terciario medio al Cuaternario, que cubren toda la parte centro y sur del área.

Las relaciones estratigráficas entre las distintas unidades Mesozoicas son complejas debido a la presencia de cabalgaduras y fallamientos normales. Estas rocas se encuentran afectadas a su vez por intrusivos de edad Terciaria (Aranda-Gómez et. al., 1989).

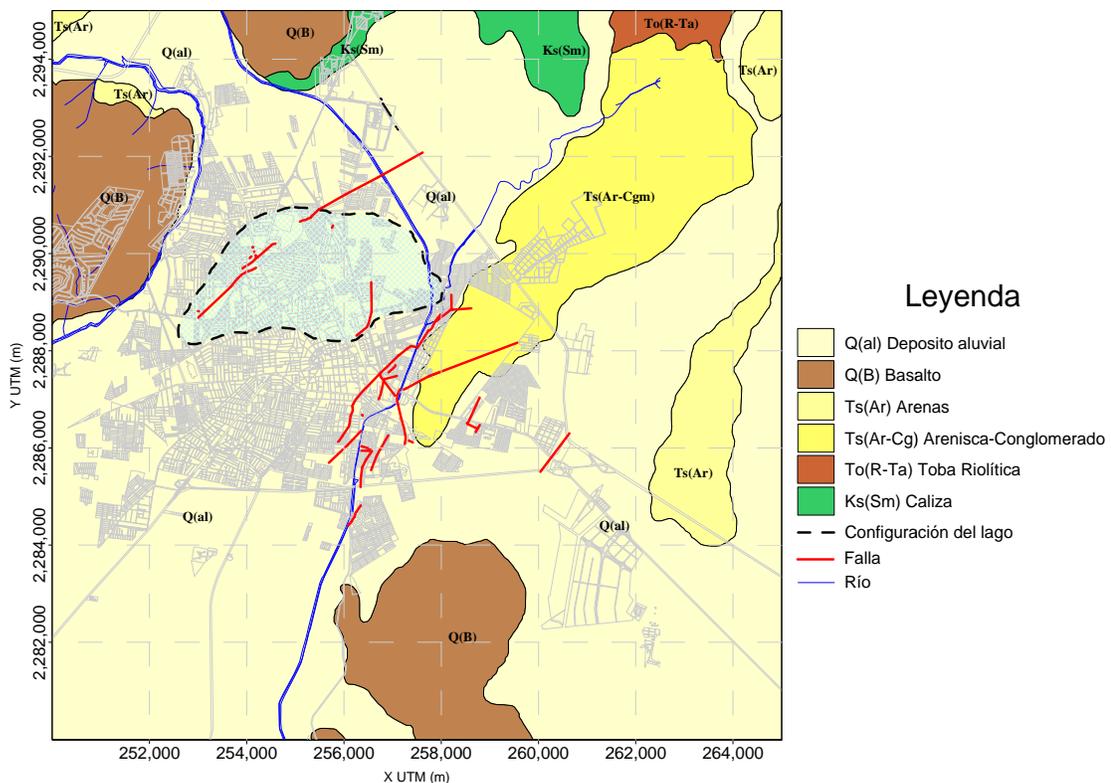


Figura 2.4. Distribución geológica superficial de la zona de Irapuato.

Se considera que las unidades del primer dominio constituyen el basamento hidrogeológico en el área ya que poseen una permeabilidad general baja. Sin embargo, la presencia de fallas que se intersecan y las zonas superficiales intemperizadas pueden favorecer la infiltración y transmisión del agua (Carreón-Freyre et. al., 2005).

La sierra de Guanajuato está afectada por fallamientos inversos de rumbo general NW-SE, por esfuerzos compresionales de dirección SW-NE. Las estructuras Terciarias están representadas por fallas de tipo normal de orientación NW-SE (falla del Bajío), NE-SW y WNW-ESE; ENE-WSE y N-S, principalmente (Martínez Murillo et. al., 2005).

## 2.6. GEOLOGÍA HISTÓRICA

A finales de Cretácico y a principios del Terciario, la Orogenia Laramide causó grandes deformaciones en las estructuras geológicas que en la parte central del país se han manifestado de forma de grandes derrames de lava y piroclastos de composición que van de ácidas a intermedias, formando estructuras importantes.

A mediados del Terciario, la región se encontraba en una etapa erosiva, cuando se produjo un gran vulcanismo en la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), causando un levantamiento ígneo de grandes proporciones formándose la gran meseta neovolcánica con las estructuras de mayor altura. Durante esta etapa, se registraron grandes periodos de calma donde la erosión depositó gruesas capas de sedimentos, formándose grandes lagos y lagunas donde se depositó material calcáreo en ambientes lacustres, como es el caso particular del valle.

Posterior a la intermitente actividad volcánica, se dio la etapa actual donde se produjo la erosión eólica y fluvial que cubre la cuenca, en este mismo periodo se dieron esfuerzos tensionales dando origen a las fosas tectónicas locales y en las que se ha depositado con espesores variables. En el curso de esta última etapa, se han producido cambios en las estructuras que han modificado el curso natural de los drenes formándose meandros y cambios de manera abrupta en la dirección del flujo. El relleno sedimentario sobre el

que se asienta la ciudad de Irapuato corresponde a un medio sedimentario de Abanico aluvial (distal)-planicie de inundación

## 2.7. ESTRATIGRAFÍA

Las rocas más antiguas que se han reconocido en el estado son de edad Mesozoica, estas rocas se pueden dividir en dos grandes secuencias: una vulcanosedimentaria, la cual se encuentra distribuida en la parte central del estado y la otra que se encuentra localizada en la parte noroccidental y se trata de una secuencia de plataforma.

Las rocas Mesozoicas están cubiertas por una discordancia angular de rocas volcánicas y volcanoclásticas de edad Terciaria y en la cima, rocas sedimentarias continentales y derrames basálticos Cuaternarias (Figura 2.5).

### *Cenozoico*

Dentro de este periodo el estado de Guanajuato sufre una actividad volcánica que origina nuevos relieves topográficos que dan lugar a la formación de sierras y valles, algunos ejemplos son las Sierras de León–Guanajuato, Agustinos–Puruagua y la Mesa del Centro. Posteriormente, se dio una depositación de sedimentos en un ambiente continental. En el área afloran rocas volcánicas y sedimentarias de origen continental con edades que varían del Eoceno al Pleistoceno (Figura 2.4).

### Terciario sedimentario continental

El *conglomerado Guanajuato* es la roca más antigua en esta región, el cual es un conglomerado polimíctico de color rojo provenientes de rocas del Triásico y Cretácico, que en algunas zonas tiene coloraciones verdosas. Esta unidad aflora en la parte norte del distrito minero de Guanajuato y presenta

un contacto discordante con rocas de edad Mesozoica (Ramos-Leal J. et. al., 2007). Este conglomerado subyace a la formación conocida como Losero, la cual consiste en mayor proporción a clastos angulares de origen volcánico. Esta unidad presenta intercalaciones de arenisca fina, horizontes tobaceosriolíticos y derrames basálticos. El espesor máximo reportado se encuentra en el distrito minero de Guanajuato, el cual es de 1,500 m, la unidad está ubicada en el Eoceno a Oligoceno (Pérez Venzor et. al., 1996).

La *Formación Losero* se encuentra en concordancia sobre el conglomerado Guanajuato y esta es una arenisca tobaceariolítica, textura arenosa y estructura en lentes horizontales en capas delgadas, su localidad tipo se encuentra en la presa “La Olla” en las inmediaciones de la ciudad de Guanajuato, el espesor es entre 5 a 25 m y su edad puede ubicarse en el Eoceno tardío al Oligoceno temprano.

#### Terciario volcánico-clástico

El *Conglomerado Calderones* se encuentra cubierto por derrames andesíticos y se caracteriza por la depositación de derrames volcánicos y rocas volcanoclásticas de composición intermedia a básica; tiene su mayor distribución en las sierras de León–Guanajuato, Puruagua, y en el centro y sureste del estado. Es un paquete de areniscas, conglomerados, brechas, tobas y cenizas de composición andesítica con interestratificaciones esporádicas de dacitas, el espesor de esta unidad es de 20 m y se le asigna una edad Oligocénica tardía.

La unidad de *El Cedro* constituye derrames de lava andesítica y basáltica, en la parte inferior tiene intercalaciones de toba andesítica, es de color ocre oscuro y gris en lavas y verde oscuro y grises en las tobas, la edad de esta

unidad es del Oligoceno medio y su espesor es de 200 a 250 m (Gross W. H., 1975).

#### Terciario volcánico

La *Riolita Bufa* consiste en derrames piroclásticos de composición ácida con fragmentos de líticos y pómez, generalmente tiene estructura masiva pero en algunos casos se observa con estructura columnar, tiene un espesor de 180 m, pero en la localidad tipo que se encuentra en el cerro de la Bufa el espesor llega hasta 350 m, su edad se ubica en el Oligoceno medio de acuerdo a su edad por K/Ar de  $37 \pm 3$  m.a. (Ramos-Arroyo et. al., 2004).

Otra unidad dentro del Oligoceno tardío y Mioceno temprano es la *Riolita Chichíndaro* la cual se constituye de derrames de lavas y de tobas ácidas que forman domos riolíticos, con esta estructura están asociados diques. Esta unidad presenta cuellos volcánicos que son los centros de emisión, los cuales tienen estructuras de flujo bien definidas, estos flujos están intercalados por brechas y tobas que sufrieron intrusión de diques asociado con nuevos eventos volcánicos. Esta unidad fue descrita originalmente por Echegoyén-Sánchez y colaboradores (1970) en el Distrito Minero de Guanajuato y es correlacionable con la Riolita San Miguelito descrita en San Luis Potosí por Labarthe-Hernández et. al., (1982). La mayor parte de esta unidad está formada por domos de lava, cuya composición característica es riolita rica en sílice y alta en potasio (Orozco-Esquivel y col., 2000). También se ha reconocido la presencia, aunque en volúmenes subordinados, de traquita y riodacita. Asociados a las lavas se observan ignimbritas, tobas, vitrófidos y brechas, los cuales comúnmente forman parte de las estructuras dómicas. El espesor estimado para esta unidad es de 400 m para las partes más gruesas.

Pasquaré et. al., 1991, ha denominado al conglomerado Xoconoxtle a todas las unidades conglomeraticas que afloran en los alrededores de la Sierra de Guanajuato como producto de la erosión de rocas volcánicas de grandes pilares de ignimbritas y andesitas provenientes de la Sierra Madre Occidental, también se presentan algunos fragmentos de rocas metamórficas y sedimentarias pobremente clasificadas.



Figura 2.5. Columna estratigráfica de la zona de estudio. (Tomada de monografía geológico-minera del estado de Guanajuato, COREMI).

Estas rocas afloran en el área de estudio, en la parte noreste de la misma, en los alrededores de la Sierra de Guanajuato, y está constituido por clastos gruesos de ignimbritas y en menor proporción de fragmentos andesíticos con estructura masiva, fragmentos que van de subredondeados a redondeados, intercalados con arenas y arcillas, en matriz arcillo-arenosa, además de horizontes de rocas areniscas alternando con limolitas pobremente cementadas, interestratificadas con capas de conglomerado (Alaniz-Álvarez et. al., 2005). El color de esta unidad abarca desde el color blanco a rosa, pero algunas veces adquiere una coloración más rojiza, confundándose algunas veces con el conglomerado rojo de Guanajuato.

#### Secuencia Volcánica del Mioceno Tardío

Al paquete descrito anteriormente le sobreyacen discordante en la parte noroeste de la zona de estudio se encuentra intercaladas con calizas lacustres Terciarias asociadas al emplazamiento de cuencas endorreicas. En la cima de esta secuencia afloran derrames de andesitas y basaltos esta unidad fue datada en el volcán Palo Huérfino en 16.11 Ma. (Pérez et. al., 1996).

Las principales unidades que se agrupan en esta secuencia son: Basaltos Río Lerma, Basaltos Villa Morelos, Basaltos Querétaro, Andesitas y Basaltos Tarímbaro, Andesita La Ordeña, esta última aflora dentro de la zona de estudio con un rumbo general E–W.

La Andesita La Ordeña, se describe como una secuencia de lavas Basalto andesíticas, que se presentan en forma masiva, la unidad tiene un espesor local de 200 m aproximadamente Otros flujos de lava se asocian a esta secuencia, y pueden tener influencia en la zona de estudio como son los Basaltos Río Lerma y el Basalto Villa Morelos, al SE y S del área de estudio.

La edad de todas las secuencias ha sido obtenida por métodos radiométricos y por correlación estratigráfica, ubicando a la secuencia volcánica en el Mioceno Tardío (CONAGUA, 2002).

#### Campo volcánico Michoacán–Guanajuato (Plioceno–Holoceno)

El campo en su conjunto se encuentra constituido por 900 conos cineríticos y 100 volcanes de otros tipos como son: conos, domos y grueso derrames de lavas asociadas con los conos y maars; además de que se han reportado 300 volcanes que se encuentran formando un escudo de volcanes de aproximadamente 10 km de diámetro (Ban et. al., 1992).

Para los derrames de lavas andesíticas conocidos localmente por andesita la Ordeña la cual se encuentran en las inmediaciones de San Felipe Cerro Gordo y las Adjuntas se les asigna una edad del Plioceno Tardío–Pleistoceno Temprano.

#### Cuaternario

Las areniscas y conglomerados de edad Cenozoica corresponden a depósitos aluviales y lacustres que rellenan las depresiones en toda el área de estudio. Estos sedimentos no afloran en las serranías pero si en las partes bajas donde atestiguan que constituyen el relleno de cuencas continentales, la litología de esta unidad la constituyen principalmente arenas y conglomerados pero, por otro lado existe la presencia de margas, lutitas y algunos lentes de caliza y pedernal, así como intercalaciones de tobas de caídas y material piroclástico re trabajado.

Las gravas *El Capulín* consisten de materiales no consolidados con estratificación incipiente a estratificación delgada, los clastos son de

composición andesítica en su mayoría, y en menor proporción fragmentos andesíticos inmersos en una matriz arenosa. Esta unidad de materiales no consolidados tiene espesores variables, pero se estima que está entre los 100 m, y se le asigna la edad Pliocénica-Pleistocénica.

La grava *Las Capillas* está representada por gravas intercaladas de areniscas y clastos angulares, en su mayoría es de composición riolítica y la matriz está constituida por arena, presenta una estratificación delgada o inexistente en algunos casos la edad que se le asigna es Pleistocénica-Holocénica por su posición estratigráfica. El espesor máximo observado es de 100 m (Martínez-Reyes, 1992).

## 2.8. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

Las estructuras Cenozoicas principales reportadas en el área son el *Graben de Saucedo* y la *falla del Bajío*. La primera constituye el límite suroriental de la Sierra de Guanajuato, la cual se observa como una depresión topográfica de 250 m, tiene 17 km de largo y 7.5 km de ancho con una orientación de N75°E, al mismo tiempo forma el límite sur con la Sierra de Codornices.

Dentro del graben se observan cerros redondeados y valles de arroyos anchos, lo cual difiere con sus límites norte y sur donde la topografía es más abrupta, grandes cantiles y valles de arroyos angostos y numerosas caídas de agua. En la parte suroccidental esta estructura es intersectada por la *falla del Bajío* la cual pierde su expresión morfológica en la intersección, dando la impresión de estar desplazada hacia el SW.

El graben está definido por tres fallas normales principales, la “falla septentrional” de 10 km de longitud y rumbo N65°E que limita el graben con el distrito minero de Guanajuato, “falla meridional” que limita con la Sierra de

Codornices; entre estas dos fallas que limitan al norte y al sur respectivamente existe otra falla llamada “falla La Gloria”. Estas dos últimas fallas se encuentran cortando fallas de orientación NW asociadas a la *falla del Bajío*, la edad de este evento puede definirse como Pleistoceno (Alaniz-Álvarez et. al., 2001).

La *falla del Bajío* es una serie de fallas normales que son el límite suroriental de la Sierra de Guanajuato con la planicie del Bajío, la cual está constituida de depósitos aluviales. Este sistema presenta un rumbo NW-SE, y se extiende desde la ciudad de León, Guanajuato hasta el *Graben de Saucedo* donde desaparece su expresión morfológica. Afecta a unidades del Pleistoceno como las gravas *El Capulín*.

En el *graben de Saucedo*, la dirección de las fallas es NE-SW, su edad es posiblemente Cuaternaria por que desplaza a la *falla del Bajío*. Pero existen varios casos de fallamiento en algunas localidades, las cuales podrían tener origen tectónico (Nieto-Samaniego, 1990).

## 2.9. HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

La región hidrológica Lerma–Santiago es la más importante del estado de Guanajuato, representa el 83% de su superficie, el 98% de su población y prácticamente el total de la industria existente.

La principal corriente dentro de esta entidad se conoce como Río Lerma, que fluye de oriente a poniente en la región sur. La región está dividida en varias cuencas: Río Lerma-Salamanca, Río Laja y Lago de Pátzcuaro–Cuitzeo–Yuriria. De éstas, la que abarca la porción del área de estudio es la del Río Lerma–Salamanca. La mayor parte del área de estudio está comprendida en

las subcuencas Río Lerma, Arroyo Temascalatío y Río Guanajuato, todas ellas de la Cuenca Río Lerma-Salamanca.

La cuenca Río Lerma-Salamanca drena una superficie correspondiente a la zona centro y sur del estado. Tiene su origen en la presa Solís en donde recibe las aguas de las subcuenca Presa Solís-Salamanca y forma la conocida Bifurcación del Lerma; comprende además los afluentes del centro de la entidad, Salamanca-Río Angulo, arroyo Temascalatío y Río Guanajuato-Silao. Dentro de esta subcuenca se localizan dos de los cuatro almacenamientos más importantes del estado que son: la presa la Purísima y la presa La Gavia. Además recibe las aguas del Río Turbio-Presa Palote, Río Turbio-Manuel Doblado, donde se originan el cauce del Río Turbio y finalmente Río Turbio-Corralejo. En esta área el Río Lerma recibe la corriente Arroyo Feo, que conduce aguas residuales de la zona urbana de la ciudad de Salamanca y aguas residuales industriales, que provienen del corredor industrial de esta localidad, así como de la refinería de PEMEX que se encuentra en la zona.

## 2.10. AGUA SUBTERRÁNEA

En la región Hidrológica Lerma-Santiago se ubica el Bajío Guanajuatense que presenta aparatos volcánicos de tipo basáltico y fosas tectónicas en las que se alojan lagos como el de Yuriria. Sus condiciones geohidrológicas son buenas, explotándose acuíferos formados por piroclásticos basálticos y sedimentos Terciarios de gran espesor que reciben recargas de los ríos Lerma, Laja y Turbio.

Las condiciones de explotación que prevalecen en las diversas zonas son variadas, presentándose algunas como León, Celaya, Silao e Irapuato, en

donde los acuíferos se encuentran sometidos a una sobreexplotación, que está minando gradualmente el almacenamiento subterráneo.

Según el diario oficial publicado el 31 de enero de 2003, el Acuífero Irapuato–Valle presenta un déficit de 229 Mm<sup>3</sup>/año, ya que su recarga media anual es de 522 Mm<sup>3</sup> y su descarga total es de 751 Mm<sup>3</sup>, que es la suma del volumen concesionado de 619 Mm<sup>3</sup> y la descarga natural comprometida de 132 Mm<sup>3</sup>, resultando el déficit mencionado.

Por otro lado, el balance hidráulico subterráneo reportado por la empresa Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A. de C.V. (CEASG, 1998) indica que en el acuífero existía una sobreexplotación del 32%, lo que generaba un abatimiento de los niveles estáticos de 1.47 m/año. Las áreas correspondientes a las ciudades de Salamanca e Irapuato son las que presentaban un mayor descenso en los niveles del agua subterránea.

## 2.11. SISTEMA ACUÍFERO LOCAL

La ciudad de Irapuato queda comprendida dentro del sector noreste de la región Geohidrológica Valle de Irapuato–Valle Santiago, este valle se encuentra relleno por sedimentos aluviales que sobreyacen a unidades litológicas más antiguas de origen ígneo, tales composiciones van desde básicas (basaltos), pasando por intermedias (andesitas) y finalmente a ácidas (riolitas). Se han propuesto la existencia de unidades litológicas las cuales alojan el sistema acuífero parcialmente confinado con características favorables.

### Unidades Hidrogeológicas

Las rocas que se encuentran en el área de estudio poseen ciertas características que conservan una relación directa con la presencia y circulación del agua subterránea. Tales características definen y diferencian cada tipo de roca, por lo que de acuerdo a estas características se le puede definir como una unidad hidrogeológica, en esta zona se han clasificado las siguientes formaciones como unidades hidrogeológicas:

#### *Rocas sedimentarias clásticas*

En esta unidad se comprenden los conglomerados, areniscas y limolitas que se encuentran semicompactados. Se comportan como acuíferos limitados con unidades adyacentes, no afloran en la superficie y se conoce su presencia por medio de perforaciones.

#### *Rocas ígneas ácidas*

Esta unidad hidrogeológica abarca riolitas e ignimbritas masivas, este acuífero es de bajo rendimiento y la unidad se localiza en la parte occidental de la ciudad de Irapuato.

#### *Rocas ígneas básicas e intermedias*

Esta unidad la forman basaltos y andesitas de tipo masivo vesicular, este acuífero presenta un rendimiento de mediano a alto dado el fracturamiento de la misma y se localiza en la parte central y oriental de la mancha urbana de Irapuato.

### *Depósitos lacustres y fluviales*

Estos depósitos están formados por sucesiones de gravas arenas y limos intercalado por algunos acuitardos que como se ha mencionado anteriormente, se encuentra depositado en forma de capas lenticulares distribuidos por toda la cuenca rellenando la misma con espesores variables, por esta causa la presencia de subsidencia es más importante.

Las unidades que se describen forman tres acuíferos, los cuales se explotan en la actualidad. El primer acuífero dentro de los rellenos aluvial es de tipo libre, al parecer el más explotado y susceptible a ser contaminado dentro de la zona, un acuífero dentro de las rocas basálticas que presentan porosidad secundaria por fracturamiento del material y un último que es un acuífero confinado que se aloja dentro de las rocas ígneas de composición ácida (riolitas) el cual presenta termalismo de acuerdo con el pozo del centro Expositor y de Negocios de Irapuato y los pozos de la comunidad de El Copal, al norte de la ciudad (Rodríguez et. al., 2006).

Los hundimientos no solo se asocian a la explotación de agua subterránea; otras actividades donde se presenta este fenómeno son actividades como la minería en túneles, la explotación petrolera, la explotación de yacimientos de gas natural y fuentes termales.

El término subsidencia se refiere al *“Hundimiento paulatino de suelo ocasionado por cavidades subterráneas por extracciones mineras”*, así la Real Academia de la Lengua española define a este fenómeno el cual fue utilizado por primera vez en el sector minero.

Con el fin de adoptar el término acoplado a la explotación de agua subterránea, redefinimos el término: *“Hundimiento paulatino de suelo debido a la extracción de fluidos”*, lo cual, ocasiona la generación de fallamientos en los rellenos granulares.

Los hundimientos del terreno son fenómenos geológicos que si son serios pueden causar efectos desastrosos. Sin embargo la subsidencia puede ser resultado de varios factores, el principal es la actividad humana y la acción geológica, especialmente la excesiva extracción de agua subterránea (Xue et. al. 2005).

Los hundimientos diferenciales del terreno representan la ruptura del equilibrio natural que guardan los fluidos y los sólidos bajo una cierta presión, que puede ser provocada por prolongados e intensos regímenes de explotación de estos fluidos, en el caso de las aguas subterráneas, bombeo que excede los volúmenes de recarga estimados.

En acuíferos granulares el descenso del nivel freático provoca que en la zona saturada la estructura de los granos (presión intergranular) se vea debilitada

provocando que se debilite y a su vez que se compacte y se consolide dicho material, este proceso se da de forma gradual y llega a tener grandes extensiones de terreno.

Si la formación se encuentra formada por partículas más finas que las arenas y/o gravas, este material sufre una consolidación más, disminuyendo el volumen del material fino, por lo que la despresurización de las arcillas puede dar como resultado en un incremento en el esfuerzo efectivo (effective stress) lo que se traduce en la consolidación de dicho material. Si el medio está compuesto por varias capas de material arcilloso de diferente composición sobre todo en el contenido de arcilla, el efecto conjunto de compresión da lugar a que se originen los hundimientos diferenciales del terreno (Chin et. al., 2004). Esta capa no necesariamente debe de ser somera, esta puede encontrarse a varios metros de profundidad (Hu et. al., 2002).

La subsidencia está asociada a la explotación de sistemas acuíferos locales y regionales, ya que tiene que ver más con la presencia de acuitardos que con la explotación. Los hundimientos diferenciales dañan la infraestructura urbana y el patrimonio de la población, las velocidades de los hundimientos va de milímetros a centímetros por año.

Los hundimientos se vuelven problemáticos cuando se comporta de manera irregular en tiempo y espacio a causa de la extracción de agua subterránea en diferentes puntos creando varios puntos críticos y esto a su vez provocando hundimientos diferenciales. Cuando se controla el ritmo de extracción o es esta uniformemente distribuido en toda el área, en tiempo y en espacio y/o distribuido de forma tal que esté en relación geométrica con los depósitos de material arcilloso haciendo que el terreno se hunda sin que se perciba.

Los movimientos diferenciales de los materiales granulares “desechados” han provocado la aparición de las fracturas en la parte superficial del mismo y, posteriormente por su tamaño se ha podido identificar como fracturas (Aguilar et. al., 2006). La diferencia en las velocidades de hundimientos se debe a heterogeneidades de las unidades geológicas, es decir, variación en los contenidos de arcilla, el espesor de la unidad, o simplemente las variaciones espaciales en los volúmenes de extracción. Las dimensiones de estas pueden incrementarse debido a la erosión por infiltración.

El fracturamiento en general ocurre en el límite de los paquetes que sufren compresión y en los márgenes de las cuencas dependiendo de la profundidad del basamento o el espesor de los paquetes sedimentarios.

Los paquetes granulares se desestabilizan separándose con cierta facilidad de las rocas compactas, originando la aparición de las fracturas (Holzer, 1980), por otro lado el fracturamiento promueve la infiltración de agua por lo que a su vez propicia el desarrollo de vegetación, la cual amplía la dimensión de las fracturas.

De acuerdo a algunos estudios, se creen que la clave del problema de los hundimientos de tierra es la evaluación adecuada del comportamiento mecánico de arcillas (acuitardos). (Gambolati y Freeze 1973, 1974; Helm 1975, 1976). Pero la deformación del material grueso (acuíferos) es ignorada.

LEHGGS y GCSER (1989) propusieron un modelo predictivo para calcular la subsidencia, donde el comportamiento de las capas arenosas se presenta con una elasticidad lineal y las capas de arcilla obedece a la teoría de consolidación de Terzaghi (1925), por lo que, la compresibilidad de los acuitardos no siempre es el problema en la subsidencia.

Por medio de extensómetros junto con observaciones de pozos, se han podido evaluar las deformaciones y las variaciones de la presión de poro, lo que ha facilitado entender el comportamiento de los suelos cuando el nivel freático disminuye.

En resumen, el fenómeno de subsidencia tiene tres características principales:

1. El resultado de la consolidación de estratos de arcilla por extracción de agua en acuíferos confinados se atribuye a los estratos de arcilla sobre un segundo acuífero confinado, la tasa de consolidación de las capas de arcilla es mayor o igual a 50%, si existe una disminución en la presión de poro, el acuífero puede alcanzar valores de compresión de 20% total, lo cual es la máxima compresión dentro del sistema acuífero (Shi et. al., 2006, 2007).

En la Tabla 3.1 se presenta información de la deformación diferentes capas durante el periodo de 1980-2000 en Shanghai, se observa que la compresión del 3º acuífero confinado tiene gran influencia en el efecto de subsidencia.

Tabla 3.1. Medidas de la deformación de diferentes capas en el centro de Shanghai (Modificado por Wei et. al., 2005)

Capa de suelo	Espesor promedio	Periodo de 1980-1995				Periodo de 1996-2000			
		Tasa de deformación anual (mm)	Deformación acumulada (mm)	Radio	Categoría	Tasa de deformación anual (mm)	Deformación acumulada (mm)	Radio	Categoría
1er acuitardo	31	-1.96	-29.42	29.9	2	-4.95	-24.78	21.8	2
1er acuífero confinado y 2do acuitardo	87	-1.82	-27.34	27.7	3	-3.09	-15.47	13.6	3
2do acuífero confinado y 3er acuitardo	40	-0.32	-4.82	4.9	5	-2.83	-14.14	12.4	4
3er acuífero confinado y 4to acuitardo	87	-3.13	-31.90	32.2	1	-11.21	-56.06	49.3	1
4to acuífero confinado y 5to acuitardo	78	-0.36	-5.33	5.4	4	-0.67	-3.33	2.93	5

2. La subsidencia es la deformación de unidades hidrogeológicas que se relacionan con propiedades de los materiales y con la variación del

contenido de agua ellas (Xue et. al., 2005; Shi et. al., 2006, 2007), por lo que la deformación de cada unidad es debida a su grado de consolidación y su espesor, por lo que, una misma unidad puede exhibir diferentes características de deformación espacialmente. Un factor importante a considerar es el retraso en la subsidencia en el sistema acuífero, por lo que las expresiones en superficie no son inmediatas (Shi et. al., 2006).

3. La velocidad de los hundimientos del terreno es afectada por la explotación de agua y el modo de explotación. Los hundimientos puede clasificarse de acuerdo al grado de desarrollo como resultado una serie de fallamientos, los cuales son: estado "desarrollado", "claramente desarrollado" y "rápidamente desarrollado", los cuales pueden correlacionarse con estados de poca, mucha y excesiva explotación de agua subterránea.

La subsidencia puede ser clasificada como desastre geológico y se pueden desarrollar de una manera continua y gradual. En los años 60's, en diferentes ciudades de China, se inició un programa de investigación a largo plazo para combatir la subsidencia con las siguientes medidas: (1) El estrecho monitoreo de los hundimientos del terreno con marcas de capa, extensómetros y el monitoreo de los niveles de agua subterránea, (2) regulación para el control de la subsidencia asegurando la implementación de mediciones, administración de agua subterránea, posición de la sociedad, la economía y la ley, (3) Explotación optimizada del agua subterránea lo cual se traduce en un efecto de control, sobretudo en etapas tempranas, (4) inyección de agua al acuífero para recobrar el nivel de agua y la estabilización y (5) construcción de modelos de simulación para conocer más acerca de los mecanismos de subsidencia.

Otro enfoque de la subsidencia es el que está relacionado con el proceso de creep-falla. Este fenómeno debido a la explotación de agua subterránea relacionado a un control estructural presenta escenarios donde coexisten dos elementos, la extracción de agua y la presencia de fallas estructurales. Estos elementos interactúan entre sí, haciendo factible el desarrollo del proceso, el cual puede resumirse en los siguientes tres pasos: (hundimiento diferencial, fisuras de tensión, generación de escarpe). De acuerdo con Ávila-Olivera y Garduño Monroy en 2008, el término "Creep" indica que las deformaciones de los suelos (hundimientos diferenciales) son lentas, continuas a lo largo del tiempo, y sobre todo, asísmicas, el cual obviamente no afecta al basamento subyacente asociado a la explotación de acuíferos granulares (Glowacka et. al., 2007).

Los mecanismos de generación y propagación de fracturas que se han reportado, se observan varios modelos conceptuales que tratan de explicarlo, sin embargo, hasta nuestros días no hay una metodología de predicción con aplicaciones prácticas y poder conocer el lugar donde va a aparecer un grieta y hacia donde se propagará.

Jachens y Holzer en 1982 con base en los resultados obtenidos de estudios geofísicos sobre fracturas en Arizona, propusieron un modelo con un lecho rocoso en forma de *horst* (Figura 3.1), en donde el espesor de suelo que le sobreyace, se está deformando diferencialmente. Si la zona de la superficie adopta una forma cóncava, la masa de suelo experimenta un acortamiento; y si adopta una forma convexa, la masa de suelo experimenta extensión. Los fracturamientos de acuerdo a este modelo se generarán en zonas la deformación es por extensión Lee y Shen (1969).

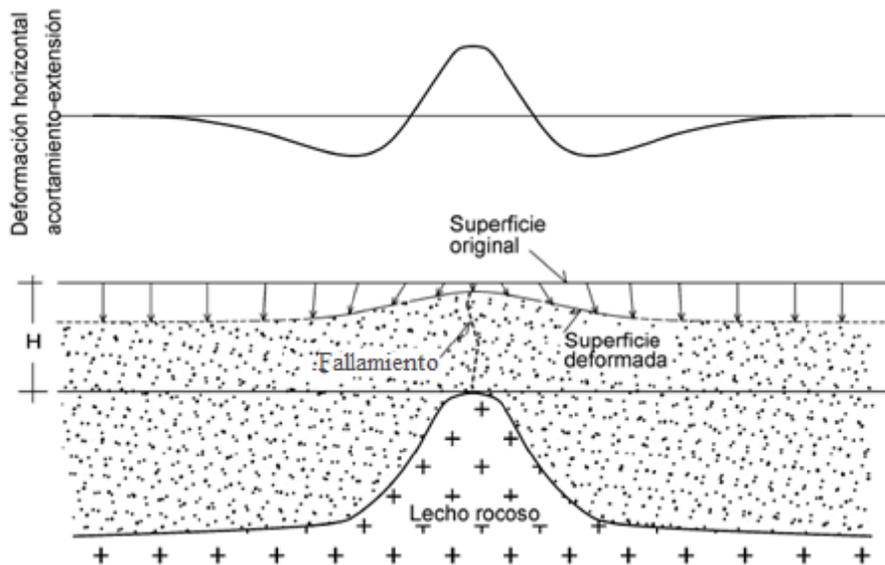


Figura 3.1. Mecanismo generador del fracturamiento según Jaches y Holzer (1982), donde H es el espesor del material antes de ser deformado, las flechas indican el desplazamiento de este y como se comporta el material ante la protuberancia del lecho rocoso.

Otro escenario para la generación de fracturas se presenta cuando se tienen irregularidades en el lecho rocoso que se quiebra abruptamente generando hundimientos diferenciales y consecuentemente un fallamiento (Figura 3.2).

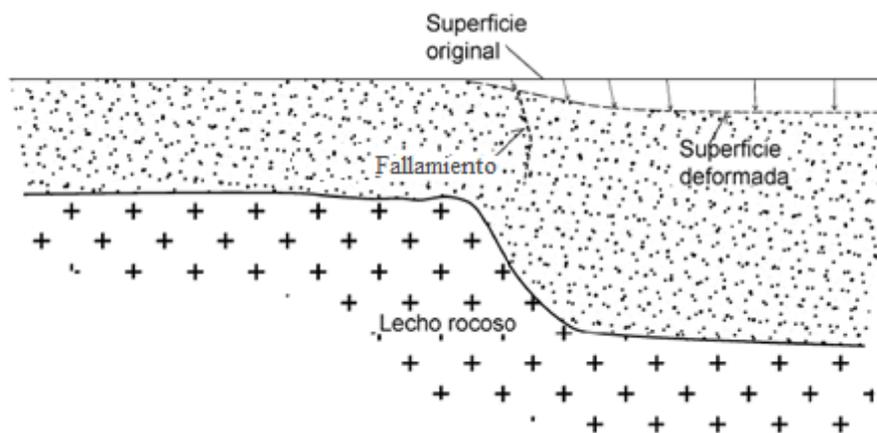


Figura 3.2. Mecanismo de generación de fracturas formado por las irregularidades en espesores.

Sheng y Helm (1995) presentan varios modelos conceptuales de escenarios donde se puede originar fallamientos cuando ocurre un abatimiento del nivel piezométrico.

Modelo 1: Este modelo considera que las interfases de diferentes estratos que conforman el cuerpo del acuífero actúan como planos de debilidad (Figura 3.3a). Las fuerzas hidráulicas generadas por la extracción que drena al acuífero, provocan un deslizamiento sobre el plano de contacto entre estratos (Figura 3.3b), en este punto se generan esfuerzos de tensión sobre un plano vertical que pueden ser mayores que la resistencia de los diferentes estratos y provocar que se genere y propague un fracturamiento.

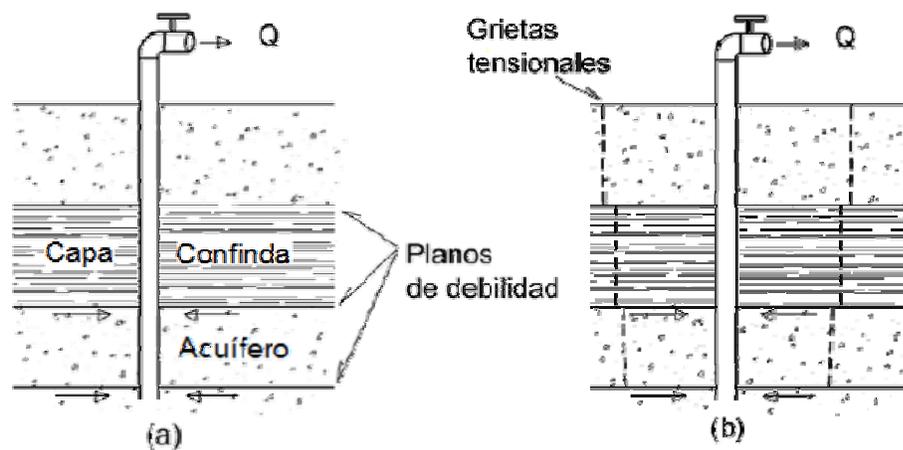


Figura 3.3. El fracturamiento como resultado de la transferencia de esfuerzos cortantes entre las interfases de los estratos Sheng y Helms (1995).

Modelo 2: Se considera un acuífero discontinuo debido a la presencia de una falla preexistente (Figura 3.4). Las fuerzas hidráulicas generadas por el bombeo ocasionan desplazamientos entre los bloques. Sobre la traza de la falla se generan los fallamientos por tratarse de un plano de debilidad.

Modelo 3: Se considera un acuífero que presenta cambios abruptos en los espesores del relleno granular o heterogeneidades (Figura 3.5) debido a esto

se provoca rotación del material, esfuerzos cortantes y deformación extensional a diferentes profundidades, provocando fallamiento de la masa de suelo que se manifiesta en superficie como fallamiento.

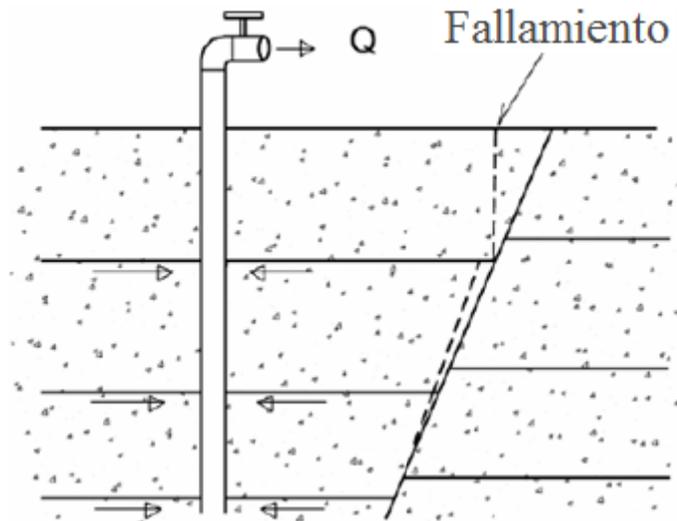


Figura 3.4. Fracturamiento controlado por una falla preexistente, se crean fracturamientos sobre la traza de la falla, Sheng y Helm (1995)

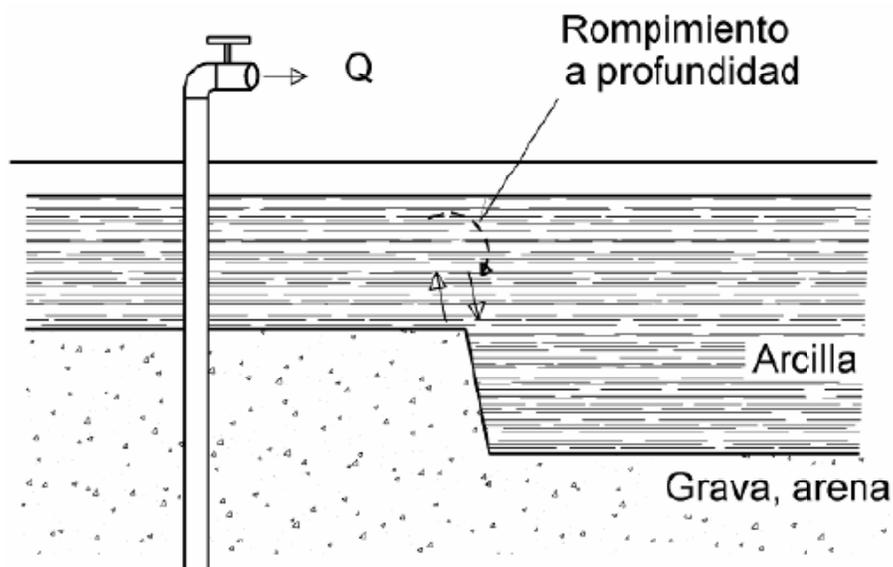


Figura 3.5. Formación de fallamiento a profundidad debido a heterogeneidades en el material y/o cambios bruscos de espesor dentro del acuífero, Sheng y Helm (1995).

A partir del modelo de generación fallamientos y fracturamientos por hundimientos diferenciales Carpenter (1999), menciona que los fallamientos se generan casi de forma instantánea después de una lluvia torrencial (Figura 3.6).

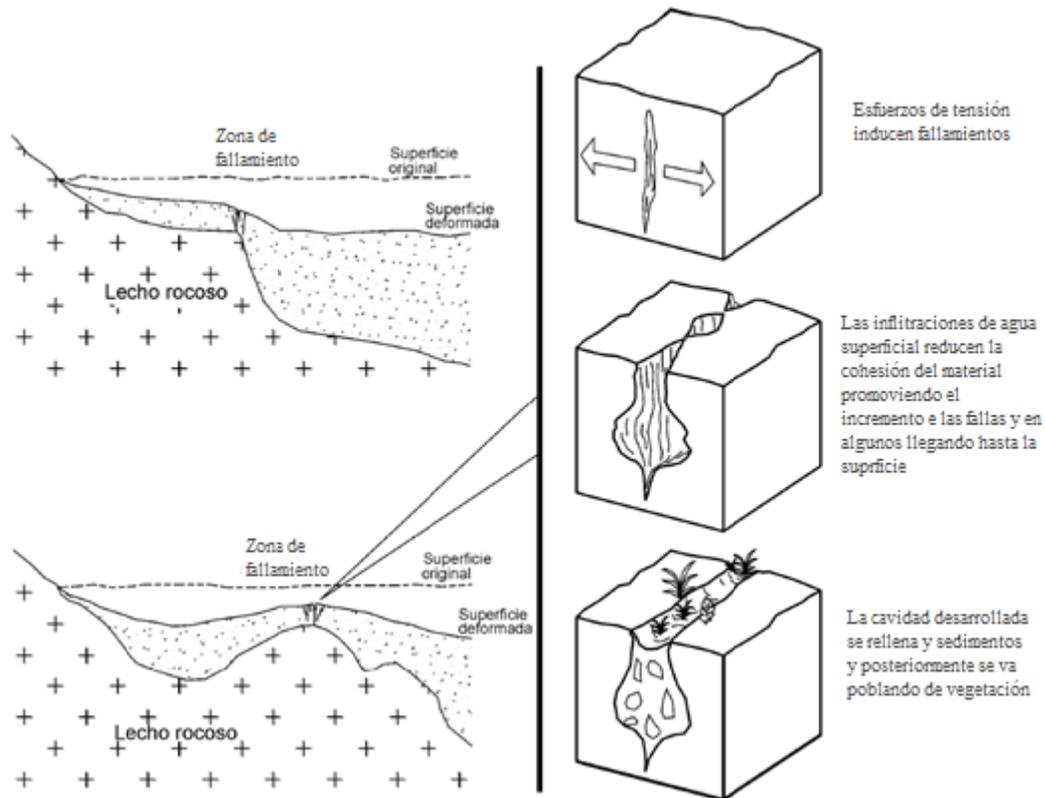


Figura 3.6. Esquema de generación rápida de fallamiento y fracturamiento después de una precipitación abundante, adaptado de Carpenter (1999).

Posteriormente Burbey (2002) presenta otro escenario de generación de fallamientos, el escenario consiste en un acuífero con fallas preexistentes en los materiales granulares. Las fallas funcionan como discontinuidades al flujo horizontal, provocando un abatimiento no uniforme del nivel de agua subterránea, generando hundimientos diferenciales y un fallamiento en la superficie (Figura 3.7).

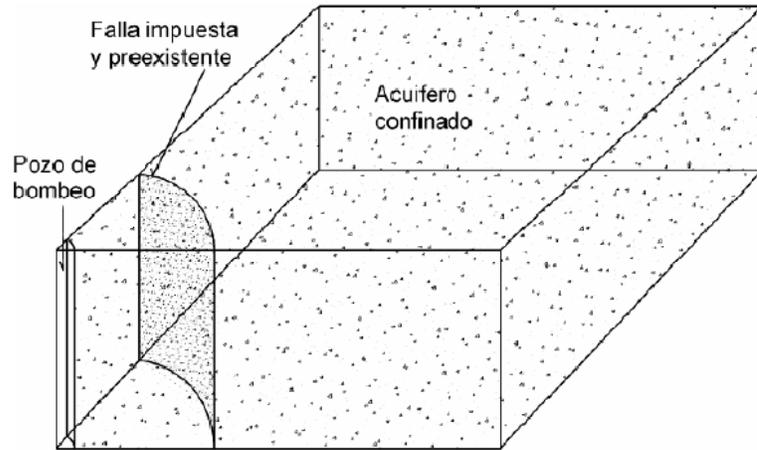


Figura 3.7. Escenario donde se pueden generar fallamientos según Burbey (2000).

Un problema de especial importancia, es el de determinar el ancho de influencia de las fracturas, por lo que se define el *ancho de influencia o zona de influencia* de una grieta como la distancia a ambos lados de esta, en donde las deformaciones son tales que pueden afectar la estabilidad de las construcciones e infraestructura. Sobre esto Raisbeck y Pedler (1985) presentan una figura esquemática que muestra el ancho de influencia, los hundimientos diferenciales se propagan a partir de un punto en el subsuelo hacia la superficie con un ángulo de  $70^\circ$  (Figura 3.8).

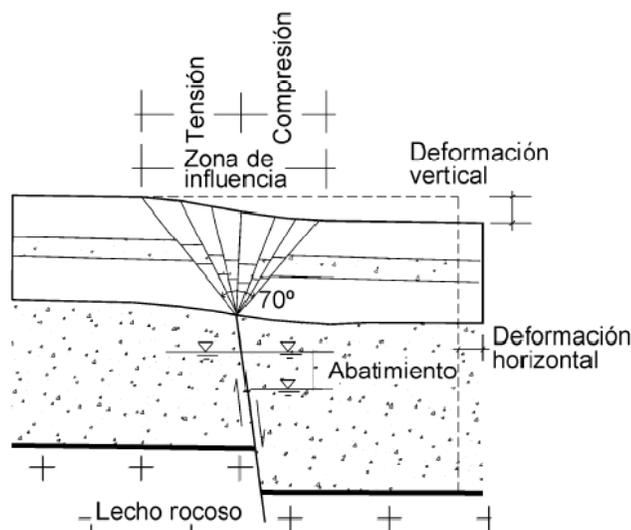


Figura 3.8. Ancho de influencia de fallamiento adaptado de Reisbeck y Pedler (1985).

Trejo-Moedano y Martínez-Baini (1991) propusieron dos mecanismos probables, uno supone que el fenómeno se genera por una combinación de la deshidratación superficial y consolidación no uniforme por efecto de las construcciones y de la extracción de agua subterránea de un acuífero heterogéneo; el otro considera una consolidación diferencial en un acuífero formado por rellenos aluviales depositados sobre un cauce, canal sepultado o fosa tectónica. La hipótesis principal de este modelo es que la magnitud de los hundimientos es función de la compresibilidad y espesor de los sedimentos afectados por el incremento de esfuerzos efectivos. La consolidación diferencial de la capa bajo el nivel de agua induce flexión a la capa superior drenada. La flexión se traduce en tensiones perpendiculares a la depresión la cual se manifiesta en fallamientos paralelos al eje de la depresión (Figura 3.9).

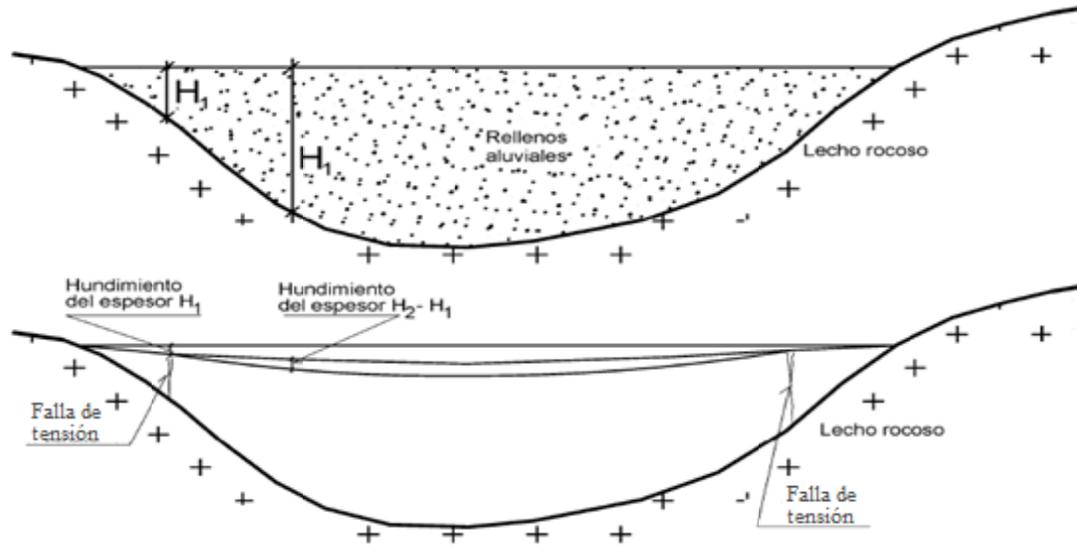


Figura 3.9. Mecanismo de formación de fracturas propuesto para las condiciones del valle de Querétaro. Adaptado de Trejo-Moedano y Martínez-Baini (1991).

Álvarez-Manilla 1999, presentó un modelo de generación de fallamientos para el valle de Querétaro, en el trabajo se considera una variación en la

profundidad del nivel piezométrico lo que se traduce en la producción de hundimientos diferenciales que inducen fallamientos en la superficie. (Figura 3.10).

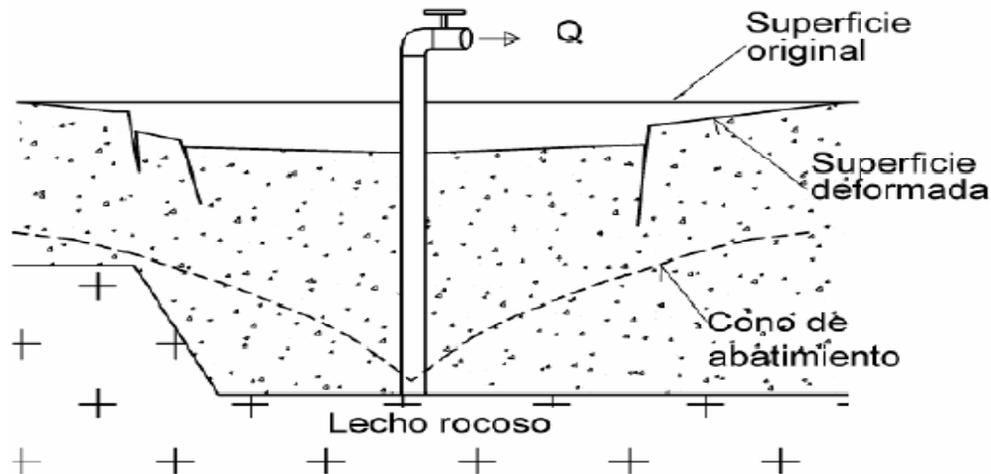


Figura 3.10. Mecanismo de Generación de fallamientos adaptado de Álvarez-Manilla (1999).

Como caso particular, en China, la subsidencia ocurre continuamente en varias provincias en las regiones del este y medias del país (Sun, 2002), con un área total de subsidencia mayor a 79,000 km<sup>2</sup>. A causa de una permanente escasez de energía, gran cantidad de agua subterránea fue bombeada como fuente de refrigeración en procesos industriales, conduciendo a un gran descenso del nivel freático y, consecuentemente, el terreno comenzó a hundirse. Esto resultó en un incremento abrupto en la explotación de agua subterránea, conduciendo a un hundimiento regional del suelo mayor a 200 mm.

Para monitorear y controlar la subsidencia, se han implementado varias medidas, como inyección de agua, prohibición del bombeo de agua subterránea confinada a grandes profundidades y ajustes en la profundidad de bombeo.

Por otro lado, en el Valle de Santa Clara en California, Wilson y Gorelick en 1996, calculan regímenes de explotación de agua subterránea y los resultados fueron comparados para determinar las posibles ventajas que se presentan en periodos de alternancia de explotación y de recuperación en un pozo.

La concentración de la subsidencia en el Valle de Santa Clara se redujo considerablemente por la existencia de un “*efecto de retraso*” en la liberación de agua almacenada en acuitardos compresibles, los cuales no habían sido tomados en cuenta, por lo que es importante incluir este “*efecto de retraso*” en los estudios de subsidencia.

Otro efecto importante que se consideran para el estudio en el Valle de Santa Clara es la variación de los niveles de agua en los periodos de lluvia y seca relacionado con los hundimientos del terreno.

El Valle de Santa Clara, al igual que el Valle de Irapuato consiste en una alternancia de arena y arcilla como resultado del depósito de material fino en ambientes aluviales y lacustres.

Existe un fenómeno de hidroconsolidación dentro del material fino, se manifiesta cuando a sedimentos no consolidados y deficitarios en agua, se añade agua a los mismos, entonces se dispone entre los granos una película de agua que provoca la disminución de la resistencia de los materiales, esto involucra colapsos instantáneos bajo una carga y en un contenido de humedad crítica (Freda J., 1988). El ejemplo clásico de hidroconsolidación fue discutido por Rogers et. al., 1994.

En Arabia Saudita a causa del crecimiento agrícola a finales de los 50's, hizo que en muchas zonas se presentara un impacto negativo significativo al

ambiente causado por un rápido descenso en los niveles de agua potable por la extracción (Roobol et. al., 1985).

En el área de Wadi Al-Yamanah se presentan fisuras las cuales se desarrollaron debido a la subsidencia. Este fenómeno es relativamente reciente en Arabia Saudita. El origen y mecanismos de las fisuras en la zona de Wadi Al-Yamanah son principalmente debidas a sismos, actividad volcánica, hidroconsolidación o excesiva descarga de agua subterránea. Con base en los resultados, se tienen tres hipótesis a cerca de los posibles mecanismos capaces de describir la formación de fisuras en la zona de estudio: a) consolidación diferencial localizada, b) fenómeno de hidroconsolidación y c) cambio de facies en el depósito aluvial.

Por otra parte, la subsidencia puede incrementarse cuando la densidad del suelo es menor, basado en valores de hundimientos.

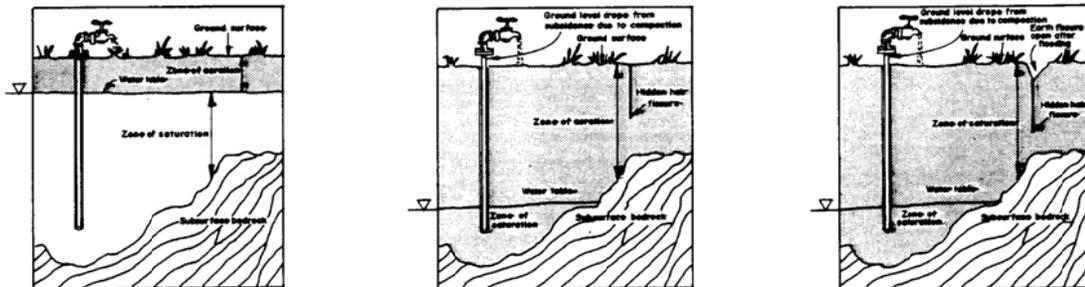


Figura 3.11. Ilustración que muestra el mecanismo de formación de fisuras de tierra. (tomada de Burbey T. J. 2002).

Algunas investigaciones geofísicas muestran que, la mayor parte de las fisuras se encuentran sobre las crestas de las superficies o el basamento y presentan una dirección preferencial que corresponde al límite del basamento formado por fallas. Esto indica que la ocurrencia de las fisuras también está controlada por la topografía.

En el Valle de Las Vegas, Nevada, la deformación producida por el bombeo del sistema acuífero en la región semiárida en los Estados Unidos, Figura 3.12, ocasiona la formación de fisuras, las fisuras continúan desarrollándose y las ya existentes se alarga y se ensanchan cerca de las fallas de relleno de cuenca.

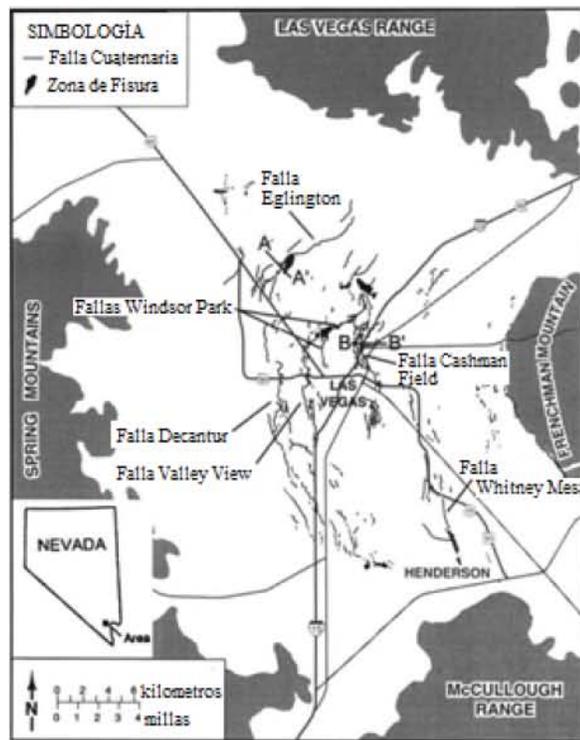
Los planos de falla promueven la subsidencia diferencial y los valores de deformación en la proximidad de la falla sugieren la existencia de un potencial de falla y desarrollo de fisuras a pesar de que la falla posee baja permeabilidad (Burbey, 2002).

El mecanismo responsable de la subsidencia vertical diferencial se ha relacionado con la variación de los espesores de depósitos compresibles cruzados por una falla vertical u otra estructura subsuperficial que abruptamente limita el potencial de consolidación (Holzer, 1978; Bell, 1981; Bell and Price, 1991; Helm, 1994).

Algunas fisuras en Las Vegas Nevada (Figura 3.12) están localizadas cerca de las fallas de relleno, similarmente en la cuenca de Picacho en Arizona, las fisuras ocurren cerca del perímetro del valle donde la profundidad de los acuíferos presentan un descenso insignificante, pero truncado por el basamento (Carpenter, 1999).

La distribución de la carga hidráulica en la cercanía de las fisuras y el resultado de los regímenes de esfuerzo sugiere que las fisuras no pueden ser iniciadas solo por el hundimiento diferencial vertical. La formación de las fisuras por efecto del descenso de los niveles de agua se ha relacionado a criterios como: clima árido a semiárido con una zona no saturada frágil, un acuífero que presenta una explotación en periodos largos e incremento en el esfuerzo, grado de consolidación bajo condiciones de esfuerzo, abrupta

discontinuidad de conductividad hidráulica consolidación vertical diferencial de espesores heterogéneos (Burbey, 2002).



SIMBOLOGÍA



Figura 3.12. Localización y sección E-W de fallas en el Valle de Las Vegas, Nevada EU. (Burbey T. J. 2002)

En México, dentro de la ciudad de Morelia se diferencia 8 fallas en la zona urbana (Figura 3.13), con un desplazamiento de hasta 80 cm con dirección preferencial ENE-WSW (Avila-Olivera y Garduño, 2008); procesos similares han ocurrido en varias ciudades a lo largo de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) como Celaya, Aguascalientes, Querétaro y la ciudad de México. (Aranda-Gómez y Aranda-Gómez, 1986; Trujillo-Candelaria, 1985, 1991; Garduño et. al., 2001; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Lermo-Samaniego et. al., 1996, Carreón-Freyre D. C. et. al., 2006).

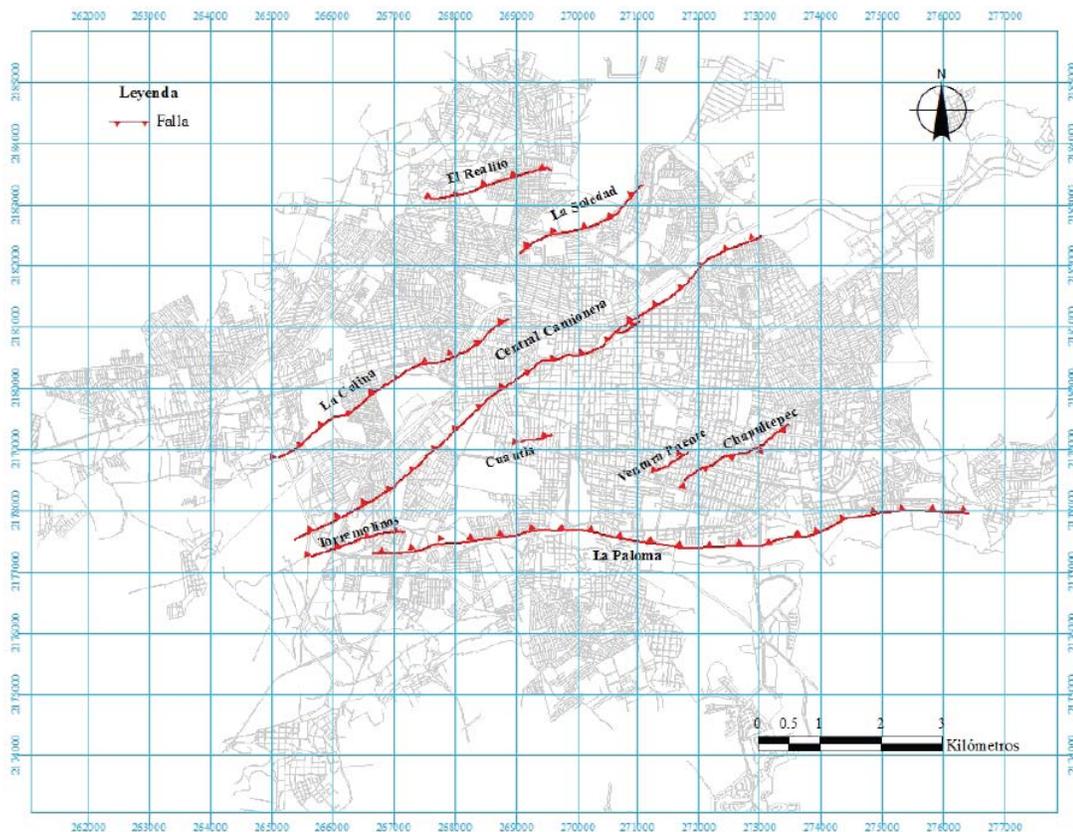


Figura 3.13. Localización de las fallas en la ciudad de Morelia, Michoacán.  
(tomado de Avila-Olivera J. A. et. al., 2008)

En la ciudad de Morelia, Michoacán, Ávila-Olivera, 2004 propone el PSCF y empezó a ser notorio desde 1983, en la zona de Chalco en la ciudad de México y en la Ciudad de Querétaro, la consolidación mecánica de los

sedimentos limo-arcillosos que rellenan valles volcánicos se manifiesta en la superficie. Esta consolidación se refiere a la deformación unidimensional que sufren diferentes tipos de materiales sedimentarios finos, que generalmente presentan una alta superficie específica y una alta porosidad, debido al desplazamiento del agua de poro en la matriz del suelo y a la eventual deformación de la fase sólida.

La deformación diferencial de materiales heterogéneos puede llevar a su fracturamiento debido a la concentración de esfuerzos de cizalla que pueden ser estimados a partir de la correlación entre la compresibilidad, plasticidad, granulometría y permeabilidad de los diferentes materiales que integran la secuencia fluvio-lacustre (Carreón-Freyre 2005, 2006).

Pacheco M. Jesús y Arzate Jorge A. 2002, relacionan los fallamientos inducidos por consolidación del suelo por extracción de agua, por lo que en sus trabajos realizan estudios para conocer la configuración del basamento y los fallamientos en el valle de Querétaro y relacionan estos fallamientos localizados en cuencas tectónicas rellenas de sedimentos Terciarios y Cuaternarios, flanqueados por fallas geológicas de carácter regional; también se observa una fuerte correlación entre los fallamientos con irregularidades del basamento, considerara como una unidad impermeable de espesor variable.

### 3.1 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA SUBSIDENCIA

Los problemas de subsidencia fueron incluidos en el programa de la década hidrológica internacional (Juárez-Badillo, 2000), aparecen trabajos reportados en la literatura que ayudan a entender el mecanismo de la subsidencia, de dichos trabajos se han desprendido varios modelos que explican este proceso: la teoría de consolidación unidimensional de

Terzaghi(1956) que retoma el concepto de esfuerzo efectivo formulado por Boussineq (1876), para calcular los hundimientos del terreno, de acuerdo con la ecuación de esfuerzos efectivos, el esfuerzo que soporta el esqueleto del suelo, es decir el esfuerzo efectivo ( $\sigma_e$ ) es igual al esfuerzo total en la masa de suelo ( $\sigma_T$ ) menos la presión de poro ( $p$ ), esto es:

$$\sigma_e = \sigma_T - p$$

Bajo este principio, cuando el esfuerzo total permanece constante, un cambio en la presión de poro causa un cambio significativo en el esfuerzo efectivo dentro del sistema acuífero, por lo que el esqueleto del sistema se expande o se comprime bajo la nueva carga.

La presión total por peso propio,  $\sigma_T$ , para una profundidad  $z$  dentro de los sedimentos está dada por:

$$\sigma_T = \gamma_m z$$

En caso de que material sedimentario se encuentre por debajo del nivel freático, la presión total para la profundidad  $z$  estaría dada por:

$$\sigma_T = \gamma'_m z$$

Donde  $\gamma_m$  y  $\gamma'_m$  son los pesos volumétricos en condiciones de parcialmente saturado y totalmente saturado, respectivamente.

Para el proceso de consolidación unidimensional (Terzaghi, 1956) desarrollo su teoría que se resume en la ecuación diferencial del proceso de consolidación partiendo del concepto de esfuerzo efectivo. La ecuación de consolidación tiene una relación entre la presión de poro, la profundidad y el tiempo.

$$\frac{k(1+e)}{\alpha_v \gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

En la ecuación  $k$  es el coeficiente de permeabilidad de la masa,  $e$  es la relación de vacíos,  $\alpha_v$  es el coeficiente de compresibilidad del suelo,  $\gamma_w$  es el peso específico del agua,  $u$  es la presión de poro y  $z$  es el espesor del depósito.

En depósitos finos como limos y arcillas, el fenómeno de consolidación que se presenta en una columna de suelo de espesor  $h$  ante un incremento de carga  $\Delta p$  está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta h = \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} h$$

$e_0$  y  $e_f$  son las relaciones de vacíos que se presentan dentro del depósitos antes y después de aplicar la carga  $\Delta p$  a la columna de material, por lo que  $\Delta h$  es la diferencia de longitud del material por efecto de la carga aplicada.

La teoría de consolidación unidimensional se ha adaptado para aplicación de problemas de hundimientos de terreno por explotación de agua subterránea Helm (1975, 1976). El modelo que considera que los hundimientos son causa de una despresurización como resultado de la disminución de los niveles piezométricos. Dicha despresurización ocasiona que la disminución de espacios vacíos dentro del material fino (acuitardo) intercalado por acuíferos.

Cuando el esfuerzo efectivo ( $\sigma_e$ ) decrece por incremento en la presión de poro ( $p$ ) se expande, de forma contraria si  $\sigma_e$  se incrementa el sistema se comprime.

El modelo que conceptual el drenado de un acuitardo (Poland J. F., 1984), es una aplicación del concepto de esfuerzos efectivos que estima los hundimientos del terreno por efecto del descenso de los niveles de agua dentro del sistema acuífero (Figura 3.14).

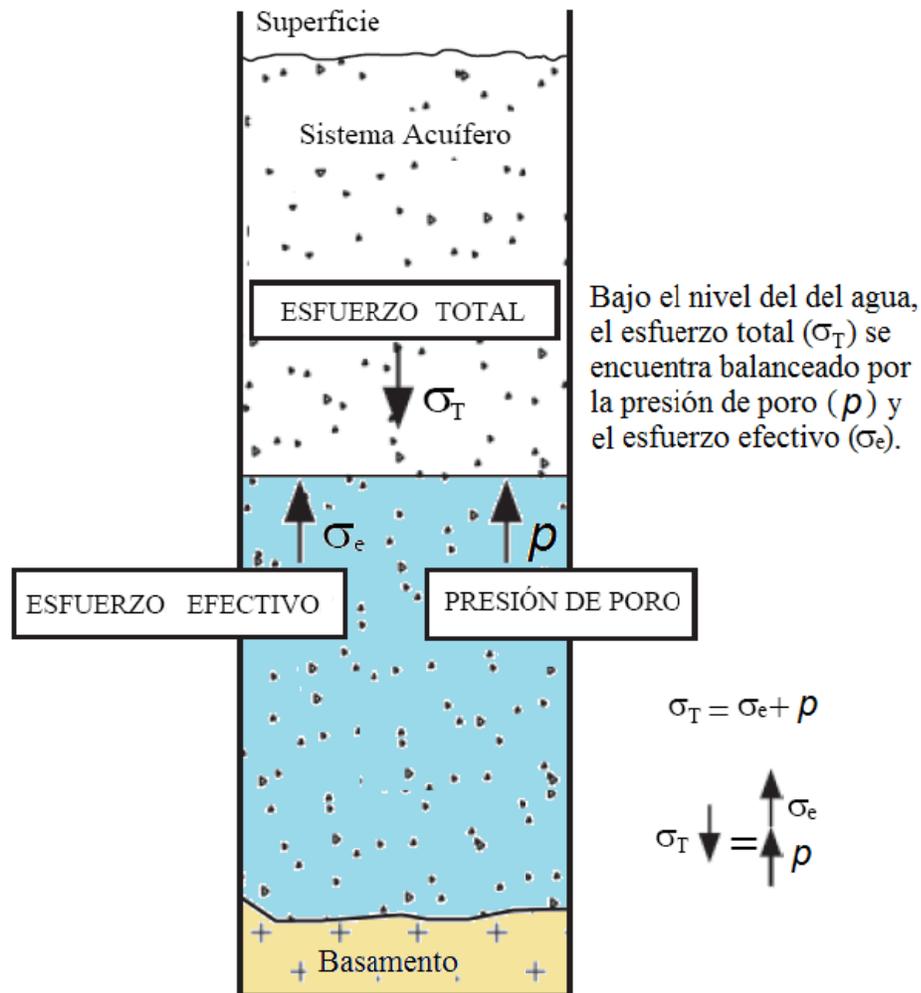


Figura 3.14. Esquema del principio de esfuerzo efectivo de Terzaghi, (Galloway et. al., 1999)

El esfuerzo efectivo ( $\sigma_e$ ) aplicado a la subsidencia se puede visualizar como desplazamientos verticales, de los hundimientos de tierra  $\Delta b$ , que es el resultado del decremento de la presión de poro ( $p$ ) y un incremento resultante en el esfuerzo efectivo que se ejerce en el plano horizontal situado

por debajo de la superficie bajo condiciones de esfuerzo total dentro de un medio completamente saturado.

La carga litostática o carga total de sedimentos y el agua con una cierta profundidad es igual al producto del peso de sedimentos húmedos, el espesor de la zona no saturada más el producto del peso de sedimentos saturados y el espesor de sedimentos saturados. Por otra parte, Biot (1941) desarrolló la teoría general de consolidación tridimensional en un medio poroso, en el cual se hace en una relación constitutiva esfuerzo–deformación, con esta teoría fue posible implementar simulaciones del fenómeno de subsidencia más apegado a la realidad.

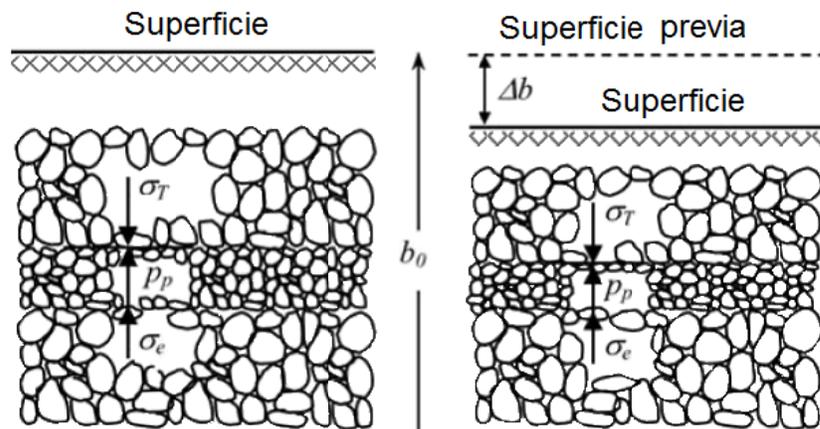


Figura 3.15. Principio de esfuerzo efectivo, donde  $\sigma_T$  es el esfuerzo total,  $P_p$  es la presión de poro y  $\sigma_e$  es el esfuerzo efectivo. (tomado de Nguyen et. al., 2005).

El principio de esfuerzo efectivo provee un vínculo entre la explotación del agua y la subsidencia. Dentro de un acuífero granular, la presión de poro es equivalente a la carga hidráulica. Ya que el agua es extraída de un acuífero libre y el nivel freático disminuye, el esfuerzo efectivo en el acuífero aumenta a pesar de que el esfuerzo total se mantiene constante. Este es el incremento en el esfuerzo efectivo que causa la consolidación del suelo lo cual lleva a la subsidencia (Larson y otros 2001). Cuando la carga hidráulica

desciende más que la carga más baja previa, la consolidación puede ser inelástica. La consolidación inelástica resulta de un reordenamiento no reversible del esqueleto, y cuando la carga sube sobre la carga más baja previa, la recuperación elástica puede tomar lugar debido a la expansión elástica de los granos (Wilson y Gorelick 1996).

### 3.2 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS EN PROBLEMAS DE SUBSIDENCIA

La aplicación de métodos geofísicos para investigar los de hundimientos por la extracción de agua subterránea, donde se utilizan los registros de resistividad para determinar del número, espesor y ubicación en profundidad de los acuitardos dentro de un sistema acuífero.

Jachens y Holzer (1979 y 1982) realizaron mediciones magnéticas y gravimétricas, donde encontraron que los fallamientos corresponden espacialmente con anomalías magnéticas y gravimétricas.

Los fallamientos son el resultado de hundimientos diferenciales provocados por un lecho rocoso irregular sepultado por sedimentos, que inducen deformaciones de extensión en la superficie.

En un estudio para caracterizar un fallamiento superficial en el Oeste de Arabia Saudita, Bankher y Al-Harhi (1999) reportaron el uso de mediciones magnéticas y de resistividad en la determinación del relieve del lecho rocoso. Con base en los datos concluyen que el fallamiento se genera sobre una falla sepultada por el relleno sedimentario.

### 3.3 DISCUSIÓN Y COMENTARIOS

De la revisión bibliográfica se observa que existe una heterogeneidad en cuanto a los conceptos que generan el problema, sobre todo referente a los términos empleados para nombrar al mismo fenómeno.

La teoría de consolidación unidimensional y esfuerzos efectivos de un estrato saturado, las consideraciones básicas bajo las cuales se formula la teoría no se cumplen en el proceso de subsidencia salvo, en acuíferos confinados donde existe una presión de poro mayor que la hidrostática y la disminución en la presión no implica necesariamente un cambio de estado saturado a parcialmente saturado en el relleno sedimentario; o en las lentes arcillosas, las cuales tienen un coeficiente de permeabilidad pequeño y provocan un retardo en el proceso de equilibrio de presiones.

La teoría general de la consolidación tridimensional al igual que la unidimensional, está sustentada por el acoplamiento que se produce en una masa de suelo entre las presiones del fluido y las deformaciones en la parte sólida del suelo. Se reconocen dos tipos de acoplamiento:

- a. Acoplamiento del sólido al fluido. Ocurre cuando un cambio en el esfuerzo aplicado sobre la masa del suelo produce un cambio en la presión del fluido.
- b. Acoplamiento del fluido al sólido. Ocurre cuando un cambio en la presión del fluido produce un cambio de volumen en la masa de suelo.

De manera general el problema de hundimientos del terreno se visualiza como un problema causado por despresurización del acuífero o de los acuitardos intercalados en el material permeable del acuífero.

Se ha manejado la hipótesis de que la generación de los fallamientos está controlada por la forma del lecho rocoso que subyace a la masa de sedimentos del acuífero granular.

La magnetometría ha resultado útil en la identificación de estructuras asociadas con la topografía del basamento, aunque tiene algunas desventajas, puesto que el método es sensible al ruido electromagnético.

El método gravimétrico ha sido el que mejor resultados ha proporciona para determinar la topografía del lecho rocoso debido a la relación directa entre los valores de la anomalía con la profundidad al piso rocoso.

En este trabajo abordaremos únicamente el estudio de la subsidencia y la generación de fallamientos originados por la sobreexplotación del agua subterránea, y en particular la ocurrencia de estos en el valle de Irapuato.

En lo que se refiere al estudio de los fallamientos superficiales se reconocen dos líneas de investigación: una encaminada a la detección del fenómeno cuando este ya ha comenzado a formarse aunque no sea aún evidente, y otra dirigida a la predicción del fenómeno es decir, a zonificar el riesgo de que se genere. En este trabajo se aborda más a la primera la línea de investigación, en la cual realiza la detección y descripción del fenómeno, sin embargo, el trabajo se refiere más a la descripción de la subsidencia y la tendencia de evolución dentro de la zona de Irapuato que a la predicción misma, por lo que la tesis desarrollada sirva como una antecedente para poder tomar algunas medidas de mitigación de la subsidencia.

Este trabajo se ha sustentado en cinco acciones principales: recopilación y análisis de la información bibliográfica, verificación geológica de campo, identificación y geoposicionamiento de fallas, cartografía de la zona de estudio para realizar la incorporación de resultados al sistema de información geográfica (SIG) y la agrupación de los diferentes grupos de fallas tomando en cuenta la dirección, forma, localización dentro de la zona de estudio y material donde se presenta la subsidencia.

#### 4.1 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La recopilación de la información consistió en buscar información en artículos relacionados con el fenómeno de subsidencia en otras partes del mundo, así como sus efectos en la infraestructura en estas ciudades y las solución que se proponen en cada uno de los casos consultados, además de la información acerca de los mecanismos que se llevan a cabo en el fenómeno de los hundimientos del terreno, la relación con la explotación excesiva de los acuíferos y la respuesta de los materiales por los esfuerzos del material.

Este estudio contempla el análisis de los datos y la comparación con casos ocurridos dentro de un panorama semejante y así relacionarlo con la aparición de fracturas por la explotación excesiva de los acuíferos que se encuentran en la zona urbana de Irapuato.

La definición del marco geológico y la caracterización del sistema acuífero se realizaron mediante la consulta de cartas temáticas geológicas y edafológicas de la zona de Irapuato y Salamanca, así como cortes geológicos de pozos proporcionados por las autoridades correspondientes. A pesar de que solo se contaron con 5 cortes litológicos, lo que limita de manera substancial la interpretación de la distribución de las unidades

geológicas, el modelo conceptual construido en este trabajo se efectuó siguiendo los patrones de depositación dadas por la geológica histórica de la región, la geología regional, geología estructural y modelos propuestos por algunos autores (García, 2007).

#### 4.2 VERIFICACIÓN GEOLÓGICA

Después de la recopilación bibliográfica de artículos publicados y otros materiales como tesis, cartas magnéticas, cartas geológicas elaboradas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), escala 1:50,000, la zona fue visitada en repetidas ocasiones para realizar los recorridos de campo y así realizar la verificación de las unidades geológicas que se describen en el capítulo anterior, después de realizar los caminamientos, se llevaron los puntos verificados y se incorporaron a un sistema de información geográfica, junto con la cartografía geológica, la ubicación de los pozos dentro de la zona de estudio, tanto agrícolas como urbanos, así como la configuración de los niveles estáticos y las profundidades de niveles de los mismos.

De acuerdo con estudios previos la zona presenta una serie de depósitos de tipo lacustres poco consolidados de edad Cuaternaria distribuidos en todo el valle de Irapuato, tales depósitos no se encuentran cartografiados puesto que la mancha urbana se encuentra sobreyaciendo estos depósitos, lo que hace difícil su detección.

Con ayuda de mapas que datan de los años 1800's, se incluyó en la cartografía los depósitos fluviolacustres dentro de la ciudad de Irapuato.

De acuerdo con las cartas magnéticas F14-C62 y F14-C63 que corresponden a las ciudades de Irapuato y Salamanca (SGM,2005) se aprecian zonas de valores altos magnéticos, los cuales se han asociado a

depósitos poco consolidados como son arenas, limos y arcillas, así como derrames volcánicos que se encuentran ubicados en la parte norte y noroeste de la zona de estudio.

#### 4.3 MAPEO DE FALLAS

Se mapearon las fallas reportadas en el Atlas de Riesgos (FOSEG, 2001). Se identificaron nuevas y se verificó la orientación y extensión de las reportadas. La identificación fue visual buscando y siguiendo tendencias de fracturas en calles y edificaciones (Tabla 5.1). Una orientación preliminar se hizo con brújula Bronton para posteriormente verificar con estación total y un GPS de doble frecuencia ASHTECH modelo Z-FX. Se ubicaron las fallas y se rectificó su posición en fotografías aéreas georeferenciadas. El desnivel vertical fue medido en puntos donde se presentan desplazamientos mayores a 0.5 m usando un distanciómetro Spectra Precision Constructor 571 con un 1 mm de precisión.

Se tomó nota de las edificaciones más en riesgo por la inestabilidad de las construcciones, su grado de afectación o por el uso de las mismas (escuelas, hospitales, etc).

#### 4.4 CARTOGRAFÍA

Después de la verificación geológica en campo y la realización de un análisis de cartas geológicas de la zona de Irapuato y Salamanca publicado por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y datos obtenidos de pozos perforados en la región se elaboró el mapa geológico, ubicando en el sistema información geográfico la distribución de los aprovechamientos y las fallas por subsidencia.

La información obtenida de cortes litológicos de pozos sirvió para elaborar tres perfiles geológicos esquemáticos que muestran de manera conceptual la distribución de las unidades geológicas en el subsuelo y como interaccionan con la subsidencia dentro de la zona de estudio.

#### 4.5 IDENTIFICACIÓN DE FAMILIAS DE FALLAMIENTO Y PROCESOS ASOCIADOS

Utilizando la cartografía desarrollada con ayuda de la geología de campo, datos geofísicos y la distribución de las fallas dentro de la ciudad de Irapuato, se realizó el agrupamiento de fallas tomando en cuenta la dirección preferencial que de manera general es NE aunque en algunos casos la dirección es NW o N-S, posteriormente se agrupan considerando la zona donde se manifiesta la subsidencia, la forma de las fallas se relacionan con límites litológicos o en el caso de este proyecto la zona donde se incrementan los espesores de materiales finos o la existencia de algunos meandros originados por los ríos Guanajuato y Silao.

Aunque existen más de 1,600 pozos perforados en la zona y más de 90 de ellos controlados por el organismo operador JAPAMI, solo fue posible obtener 12 columnas litológicas, con las cuales solo fue posible estructurar 3 perfiles geológicos.

La sección A-A'-A'' se encuentra constituida por dos partes, la primera A-A' tiene una longitud de 5,253 m con rumbo S20°E, los pozos ocupados para la elaboración de esta sección son: Pozo No. 46, Pozo 83 y Pozo No. 31, partiendo del cerro Arandas llegando a la parte central de la zona urbana de Irapuato y cortando de manera transversal la falla conocida como Jacarandas/San Gabriel, en esta sección se puede observar el contacto entre el material de tipo volcánico con el material granular y lacustre, la segunda parte A'-A'' tiene una longitud de 5,730 m con rumbo S41°E, los pozos empleados para la construcción de la sección son: Pozo No. 82, Pozo No. 55, Pozo No. 34 y Pozo No. 80, pasando por la falla la Floresta, llegando a la zona conocida como San Joaquín que se localiza en la parte sur de la ciudad (Figura 5.1).

La sección B-B' tiene una longitud de 7,500 m con rumbo N08°E cruza por la parte central de la cuenca. Se elaboró con la extrapolación de los datos de columnas estratigráficas de los pozos No. 34, No. 31, No. 85, no. 66, No. 41. Esta sección parte cerca de la central de abastos, posteriormente corta el sistema de fallas conocida en este trabajo como Pradera y a su vez con los límites tanto norte como sur de los depósitos lacustres del ex-lago Eraitzicutzio (Figura 5.1).

Por último la sección C-C' tiene una longitud de 7,300 m con rumbo N64°W y corre desde los límites del cerro Arandas hasta la XII Región Militar. Este perfil interseca los límites este y oeste del ex-lago de Eraitzicutzio y a su vez

tres sistemas de fallas conocidas como Colonia La Hacienda, Plan Guanajuato y Juan Escutia, para la construcción de dicho perfil tomamos como referencia los datos de cortes litológicos de los pozos No. 46 No. 41 y No. 46, los cuales nos ayudaron junto con los datos de geología superficial y recorridos de campo a definir los espesores del material lacustre que se encuentra dentro de la cuenca (Figura 5.1).

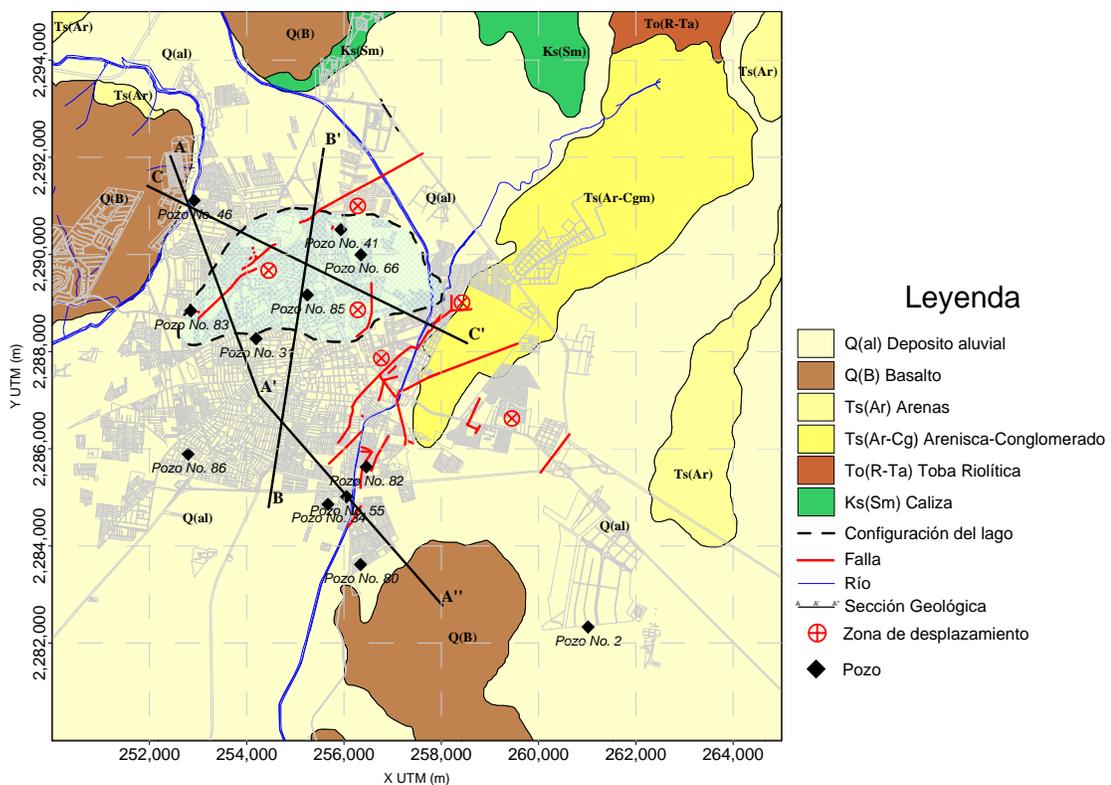


Figura 5.1. Secciones geológicas esquemática A-A'-A'', B-B' y C-C' vista en planta.

Como se puede observar en la Figura 5.1 los depósitos de material volcánico proveniente del cerro de Arandas y de la zona de San Joaquín limitan el material fino lacustre dentro de la cuenca, por otro lado el descenso del nivel freático dentro de la cuenca hace que los depósitos de material lacustre se despresuricen. Las fallas se producen en los límites del material volcánico con el material fino o en los cambios bruscos de espesor de estos materiales.

El cambio en el espesor de los materiales plásticos dentro de la cuenca se presenta en los límites del material volcánico y en donde la diferencia de espesores en materiales arcillosos es abrupta (Figura 5.2).

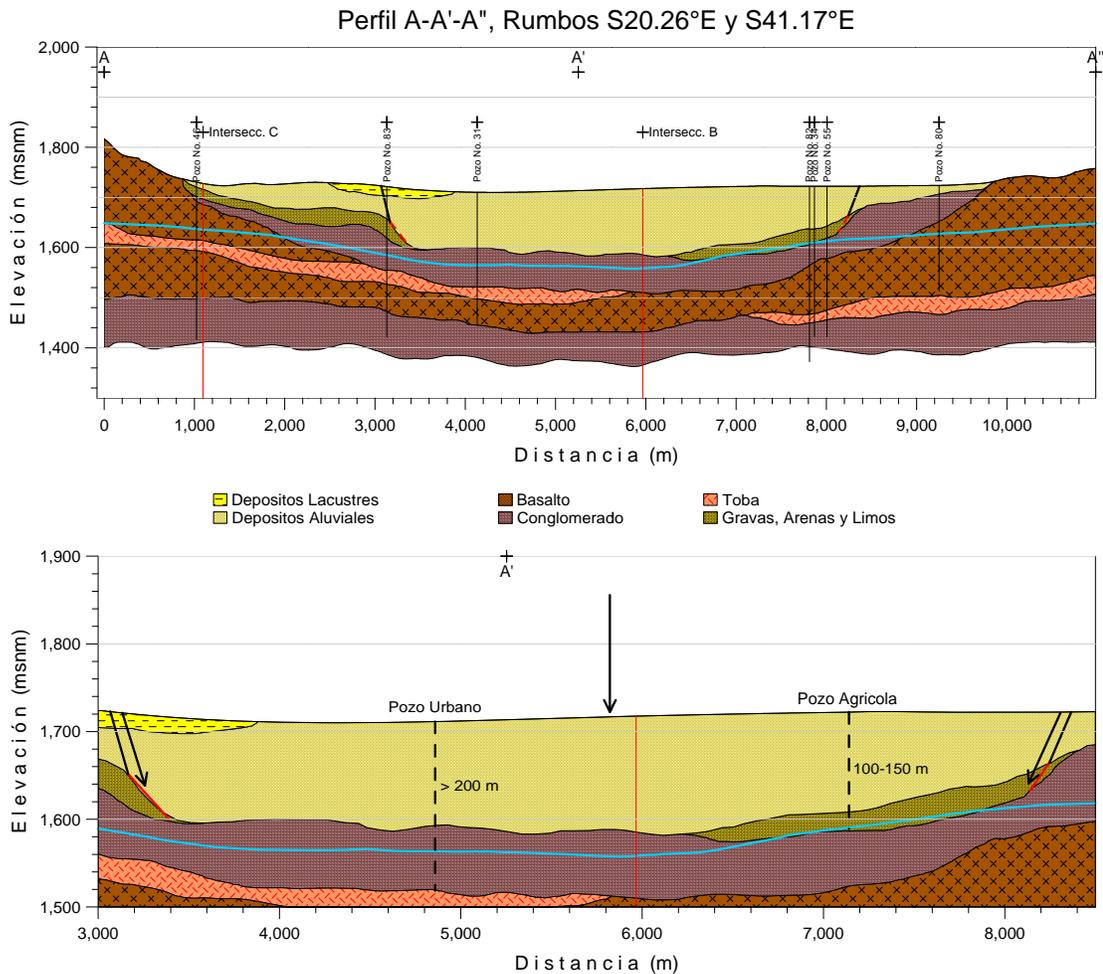


Figura 5.2. Sección geológica esquemática A-A'-A'' vista de perfil.

El espesor del material aluvial en la parte central de la sección geológica B-B' (Figura 5.3), presenta un incremento. De acuerdo con los cortes litológicos y la hipótesis propuesta en esta sección se localizan los depósitos de material arcilloso provenientes del ex-lago de Eraitzicutzio. Solo se observa una falla resultado del cambio abrupto en el espesor del material aluvial, la cual corresponde al sistema conocido como Pradera, dicha falla se encuentra en

el límite norte del ex-lago Eratzicutzio. De acuerdo al régimen de explotación dentro de los límites de la cuenca (Figura 5.6), y a la configuración de nivel estático para los años 2003 y 2005 (Figura 5.7 y Figura 5.8), se ha estimado que el abatimiento promedio en la zona urbana es de 2 m por año, donde el cono de abatimiento migra hacia la parte suroccidental. Este abatimiento se concentra en la parte suroriental de la zona urbana, sin embargo las manifestaciones superficiales de la subsidencia se encuentran concentradas en la parte sureste y noroeste de la ciudad de Irapuato.

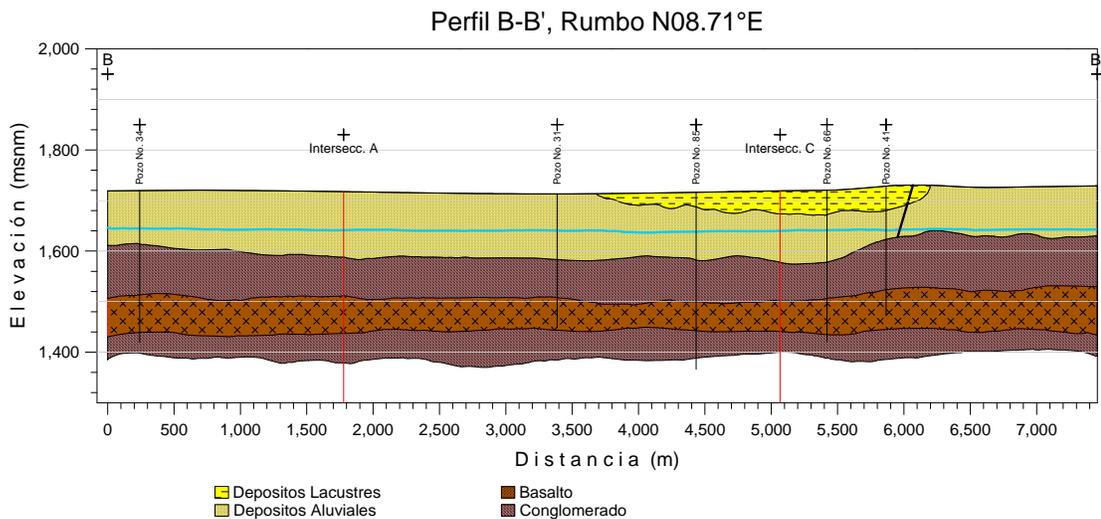


Figura 5.3. Sección geológica esquemática B-B' vista de perfil.

De igual forma en la sección C-C' el espesor del material aluvial se incrementa en su parte central (Figura 5.4). En este perfil se pueden observar desde rocas volcánicas cuaternarias provenientes del cerro de Arandas hasta materiales granulares como arenas y conglomerados de edad Terciaria las cuales afloran desde la localidad conocida como Colonia Morelos hasta la Ampliación Constitución de Apatzingán, pasando por la XII Zona Militar.

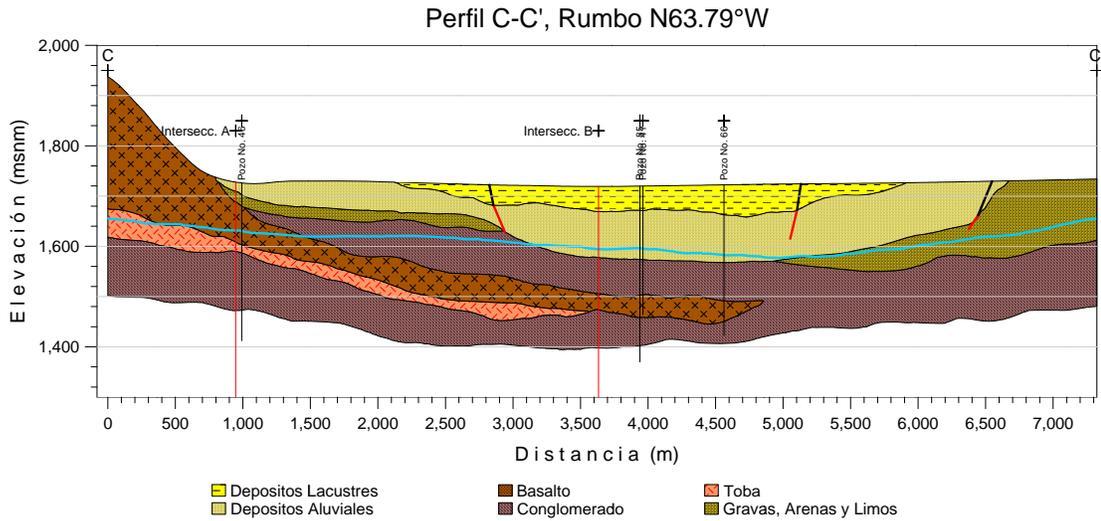


Figura 5.4. Sección geológica esquemática C-C' vista de perfil.

A partir de 1983 que se detectó la aparición de una pequeña grieta ubicada en el Blvd. Díaz Ordaz, se han reconocido 15 sistemas de fallas (Tabla 6.1); en la parte noroccidental se tiene un grupo de 3 fallas; en la parte central que es donde se concentra la mayor cantidad con un total de 7; en la parte sur se tienen 3 y en la parte suroriental 2. La suma de todas las secciones a lo largo de las fallas hacen un total de 21,237 m de longitud, todas estas fallas por lo general presentan direcciones hacia el noreste, aunque en algunas ocasiones se observa que son hacia el noroeste (Figura 5.5).

Los sistemas de fallas Jacarandas/San Gabriel (10), Colonia La Hacienda (11) y Pradera (12) se encuentra en la parte noroeste, la falla Jacarandas/San Gabriel presenta un alineamiento de N45°E en promedio, la falla La Hacienda N69°E y Pradera N58°E. Debido a la cercanía con el cerro de Arandas, estos sistemas de fracturamiento están relacionados con el límite del ex-lago Eraitzicutzio y los derrames basálticos donde el espesor de los materiales arcillosos se incrementa hacia la parte central de la zona, esta es la manifestación superficial del cambio abrupto en los espesores del material lacustre y las longitudes de cada uno de los sistemas de fallas, que

son 1,614 m, 970 m, 2,886 m, respectivamente. Los desplazamientos verticales en esta zona son de 1.5 a 2.5 cm/año.

En el Puente de Guadalupe se tiene una falla de aproximadamente 2,550 m de longitud conocido como Puente Guadalupe/San José (3), la cual está relacionada con la falla Juan Escutia (5). Estas dos fallas presentan alineamientos hacia el NE, la dirección promedio para la falla de Puente Guadalupe/San José es de N26°E y N41°W en algunos segmentos, para la falla Juan Escutia la dirección promedio es de N17°W y N07°E, esta falla presenta una longitud aproximada de 1,600 m. Las dos fallas estarían representando el límite sureste del ex-lago Eraitzicutzio y litológicamente coincide con el contacto de un material de granulometría más gruesa Ts(Ar-Cgm), el cual consiste de conglomerados polimícticos provenientes de la erosión de productos volcánicos de composición andesítica-basáltica. Hacia el final de la falla de Juan Escutia se observa la generación de una falla de aproximadamente 80 m con dirección N05°E, esta aparente división se localiza en la calle de Tuxpan al oriente de la ciudad. El desplazamiento vertical promedio en el límite sur del ex-lago Eraitzicutzio son los más importantes dentro de la zona, estos desplazamientos son aproximadamente de 7 cm/año.

La falla de Plan Guanajuato (9) por su posición dentro de la zona y su forma curvilínea y aislada se trata de la manifestación en superficie del depósito de material no consolidado producto de la acumulación de material fino proveniente de la traslación del Río Guanajuato hacia el oriente, es decir, que se interpreta como la manifestación superficial de un meandro, el desplazamiento vertical de los bloques es de 1.5 a 2.5 cm por año.

La falla Floresta (1) tiene una dirección promedio de N30°E y está conformada por cinco fragmentos con una longitud total de 515 m, se

encuentra en la parte sur de la cuenca y está relacionada con las fallas de San Roque (14) y Colón (2). La falla conocida como Colón está localizada en la parte centro-sur de la ciudad de Irapuato al igual que la Floresta. La falla Colón tiene dirección promedio de N20°E, tiene 8 segmentos los cuales suman una longitud total de 1,986 m. A su vez, también en la parte sur de la cuenca podemos encontrar la falla conocida como San Roque, esta se encuentra conformada por un solo tramo con dirección N35°E y una longitud de 970 m, este grupo de fracturas se han relacionado de manera directa por su ubicación y su dirección hacia el NE.

Tabla 5.1. Distribución de las fallas dentro de la zona urbana de la ciudad de Irapuato.

Sistema	Nombre	# Tramo	Longitud (m)	Orientación	Long. Total (m)
1	Floresta	1	130.80	N43°E	<b>515.50</b>
		2	47.60	N27°E	
		3	53.20	N35°E	
		4	83.90	N17°E	
		5	200.00	N33°E	
2	Colón	1	168.60	N01°E	<b>1,986.50</b>
		2	242.30	N08°E	
		3	171.60	N26°E	
		4	221.50	N34°E	
		5	337.60	N21°E	
		6	468.80	N29°E	
		7	184.10	N88°W	
		8	192.00	N73°W	
3	Puente de Guadalupe/San José	1	30.00	N51°E	<b>2,550.73</b>
		2	370.40	N34°E	
		3	214.40	N01°W	
		4	104.40	N22°E	
		5	66.20	N20°W	
		6	35.13	N62°W	
		7	143.10	N27°E	
		8	254.20	N40°E	
		9	902.50	N45°E	
		10	313.20	N37°E	
		11	117.20	N13°E	
4	Morelos/Río Guanajuato	1	94.51	N65°W	<b>1,202.55</b>
		2	125.80	N80°E	
		3	836.24	N12°E	
		4	146.00	N15°E	
5	Juan Escutia	1	119.80	N10°E	<b>1,592.70</b>
		2	187.80	N10°W	

Sistema	Nombre	# Tramo	Longitud (m)	Orientación	Long. Total (m)
		3	525.60	N14°W	
		4	125.80	N09°W	
		5	555.10	N37°W	
		6	78.60	N05°E	
6	Campo Militar	1	476.50	N59°E	<b>2,303.20</b>
		2	1,826.70	N75°E	
7	Colonia Olivos	1	599.50	N25°E	<b>1,001.00</b>
		2	228.70	N65°W	
		3	172.80	N30°E	
8	Trébol	1	999.55	N37°E	<b>999.55</b>
9	Plan Guanajuato	1	285.10	N38°E	<b>2,204.85</b>
		2	320.20	N73°E	
		3	600.00	N-S	
10	Jacarandas/San Gabriel	1	924.30	N47°E	<b>1,614.50</b>
		2	330.80	N45°E	
		3	135.40	N58°E	
		4	111.70	N73°E	
		5	112.30	N64°E	
11	Colonia La Hacienda	1	228.20	N58°E	<b>970.40</b>
		2	139.50	N45°E	
		3	39.00	N62°E	
		4	398.40	N48°E	
		5	65.30	N74°E	
		6	11.10	N30°E	
		7	8.20	N48°E	
		8	47.10	N45°E	
		9	8.00	N55°E	
		10	11.50	N38°E	
		11	10.20	N27°E	
		12	3.90	N50°E	
12	Pradera	1	72.10	N69°E	<b>2,886.00</b>
		2	49.00	N77°E	
		3	122.40	N65°E	
		4	24.70	N31°E	
		5	200.30	N47°E	
		6	2,417.50	N61°E	
13	Desnivel/Solidaridad	1	426.60	N15°E	<b>1,263.50</b>
		2	271.50	N76°E	
		3	497.80	N37°W	
		4	44.40	N11°W	
		5	23.20	N05°E	
14	San Roque	1	930.75	N35°E	<b>930.75</b>
15	Jardines de La Hacienda	1	215.10	N48°E	<b>215.10</b>

La falla que se conoce con el nombre de Morelos/Río Guanajuato (4) se localiza en las cercanías del puente a desnivel Solidaridad. A pesar de que esta falla se encuentra en contacto con las fallas de Desnivel/Solidaridad (13), presenta relación con las fallas aledañas Desnivel/Solidaridad y Jardines de la Hacienda (15). Tiene una extensión total de 1,200 m en cuatro secciones, de las cuales una sola presenta una longitud de más de 800 m teniendo como dirección promedio de  $N46^{\circ}E$  y  $N65^{\circ}W$  en la primera sección.

La falla Desnivel/Solidaridad está conformada por cinco segmentos los cuales convergen en el paso a desnivel de Solidaridad, los tramos suman un total de 1,250 m y está relacionada directamente con la falla Jardines de la Hacienda que tiene una longitud de 200 m con una dirección de  $N48^{\circ}E$ .

La falla que se encuentra en la zona militar conocida como la falla Campo Militar (6) tiene una longitud total de 2,300 m conformada por dos segmentos, el primer segmento tiene una longitud de 480 m con dirección  $N59^{\circ}E$ , el otro segmento presenta una longitud de 1,830 m con dirección  $N75^{\circ}E$ , sumando un total de 2,300 m. Una particularidad de este sistema de fracturamiento es que esta es la única de las fallas que se encuentra contenida dentro la zona de depósito del conglomerado Terciario.

Otras fallas que se correlaciona entre ellas, son las llamadas Trébol (8) y Colonia Olivos (7), estas dos fallas al parecer se encuentran delimitando un valle topográfico donde se pudieron depositar materiales finos y con la explotación del agua subterránea se presentaron las fallas con esa geometría particular.

Las 15 fallas geológicas que han afectado seriamente la infraestructura urbana, asimismo, estos efectos se manifiestan en 915 construcciones

urbanas (FOSEG, 2001). Los daños estimados por Rodríguez y col. (2006) son de más de 2 Millones de dólares para finales de 2006.

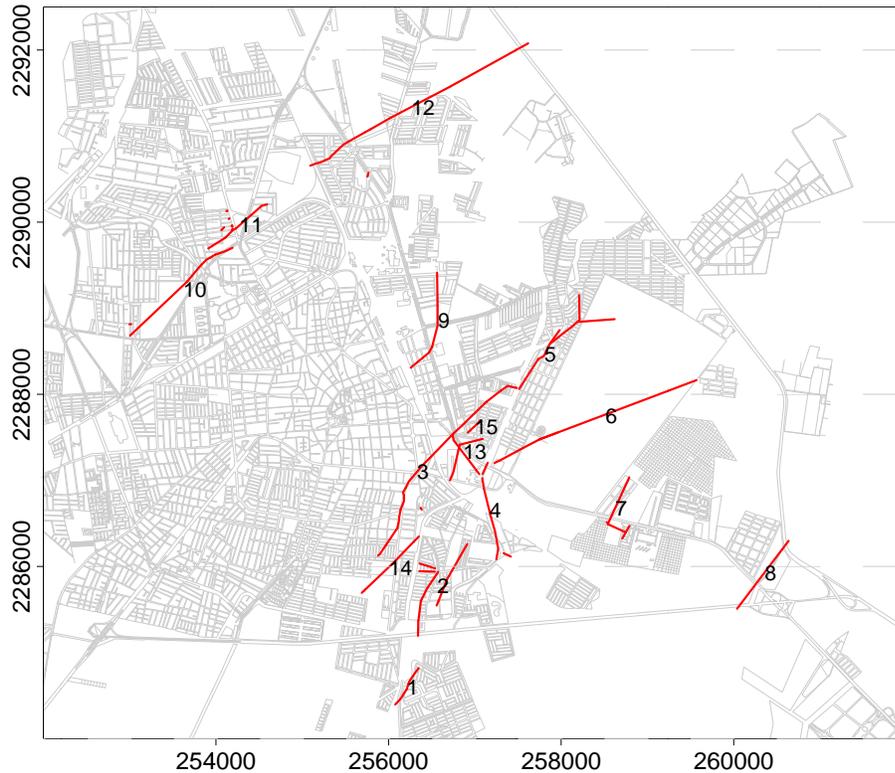


Figura 5.5. Distribución de los sistemas de fallas en la ciudad de Irapuato, Guanajuato. 1. Floresta, 2. Colón, 3. Puente de Guadalupe/San José, 4. Morelos/Río Guanajuato, 5. Juan Escutia, 6. Campo Militar, 7. Colonia Olivos, 8. Trébol, 9. Plan Guanajuato, 10. Jacarandas/San Gabriel, 11. Colonia La Hacienda, 12. Pradera, 13. Desnivel/Solidaridad, 14. San Roque, 15. Jardines de La Hacienda (modificado de Rodríguez et. al., 2006)

Como se puede observar en la Figura 5.6, los regímenes de extracción en la ciudad de Irapuato están concentrados en la parte central con volúmenes de extracción de 10 a 500 Mm<sup>3</sup>. En la periferia y algunos puntos dentro de la mancha urbana y el intervalo de extracción máximo se encuentra en la parte central de la zona urbana. El contacto estratigráfico con el conglomerado del Terciario (Ts(Ar-Cgm)) favoreció la formación de las fallas en esta zona. Todas las fallas generadas en esta zona parecen estar delimitando el contacto de los conglomerados Terciario con los depósitos lacustres provenientes del material fino distribuido en toda la cuenca.

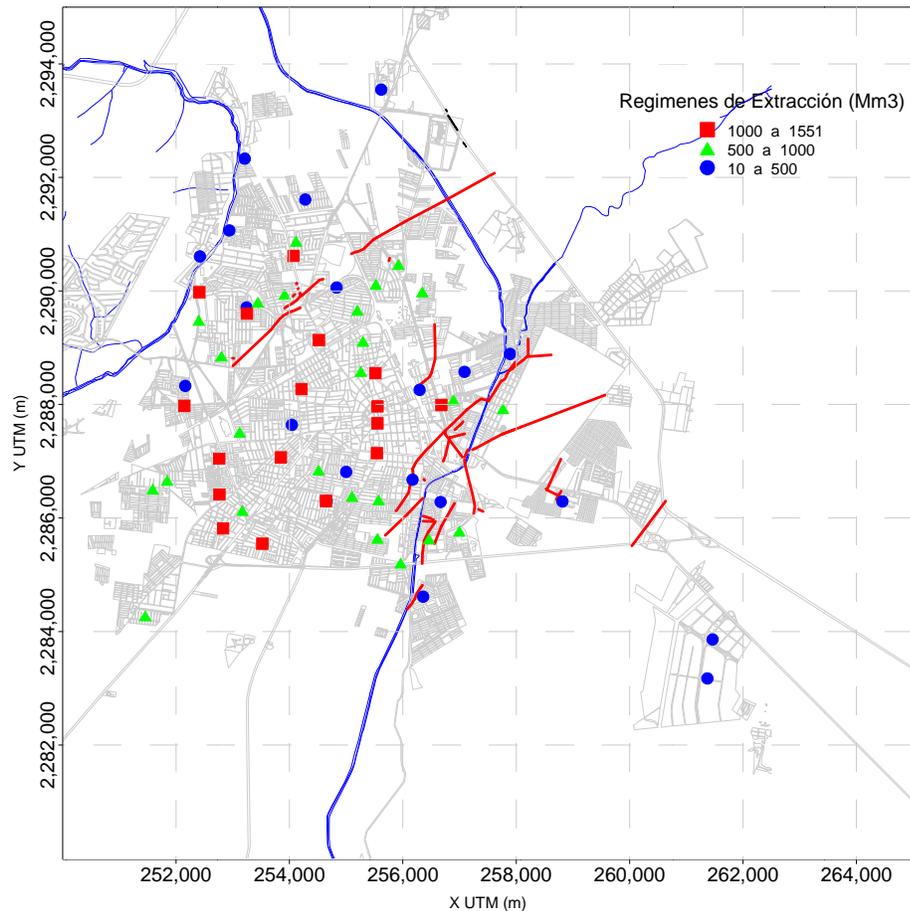


Figura 5.6. Regimenes de extracción en la ciudad de Irapuato. Millones de metros cúbicos  $Mm^3$ .

Las fallas de Jacarandas, La Hacienda, Pradera parecen estar relacionadas con el lineamiento de las fallas tectónicas del área, las cuales tiene rumbo NE-SW y que se encuentran en el cerro de Arandas, En esta área se encuentra el límite donde los espesores de los materiales finos de la zona lacustre del valle presentan un decremento en el espesor del material fino hacia el cerro de Arandas. El cambio de espesor parece no estar relacionado con los regimenes de explotación de agua subterránea, pero si con el límite entre el material volcánico de composición andesítica–basáltica y los depósitos Cuaternarios compuestos principalmente por gravas, arenas y arcillas producto de la erosión.

La elevación de nivel estático dentro de la ciudad de Irapuato (Figura 5.7) está dentro del rango entre los 1,640 msnm en la parte central a 1,700 msnm hacia la periferia de la ciudad, formando una gran zona de abatimiento piezométrico. En esta zona de abatimiento es donde se concentra la mayor cantidad de fallas y fracturas dentro de la ciudad.

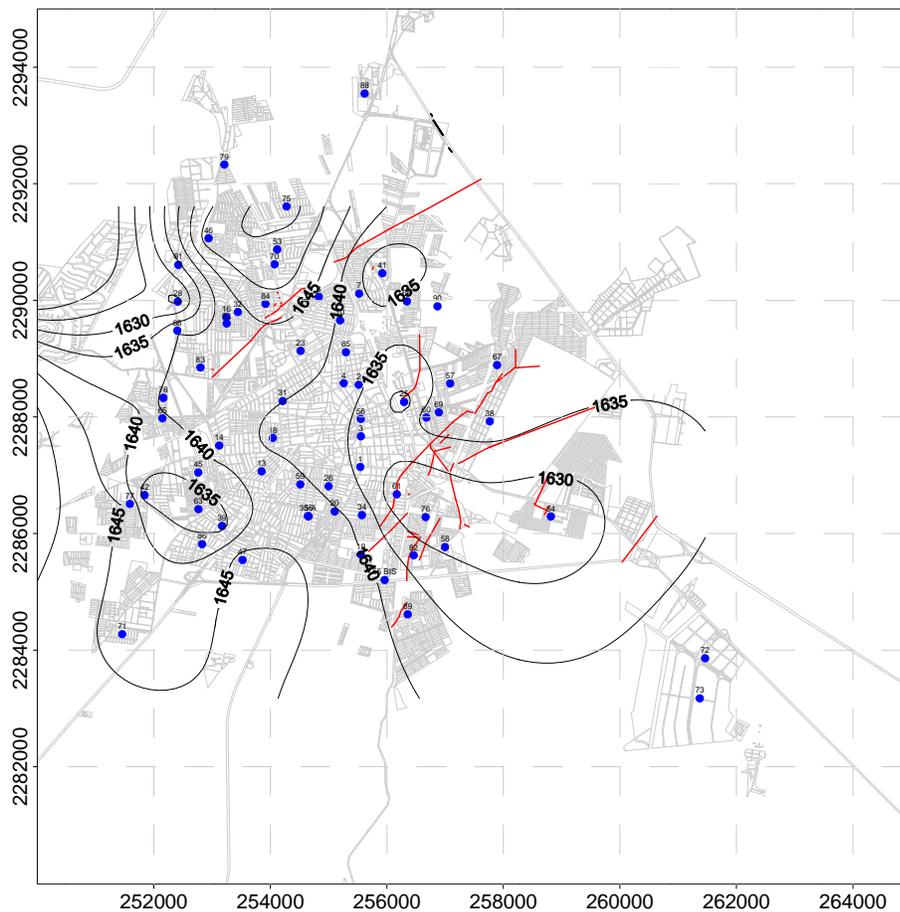


Figura 5.7. Configuración de nivel estático para el año de 2003 en la ciudad de Irapuato.

Los niveles estáticos se encuentran más profundos en la parte central debido probablemente a la extracción de pozos agrícolas más que a la explotación de pozos municipales en operación. En número son aproximadamente 65 en la ciudad mientras que los agrícolas son más de 900 en el área. De los cuales cerca de 400 están en la mancha urbana. Como se muestra en la Figura 5.6,

la distribución de las profundidades de los pozos urbanos se encuentra relacionado con la formación de fallas dentro de la zona urbana, es decir, que los pozos que tienen profundidades mayores de 200 m tienen relación directa con la formación de fallas dentro de la zona urbana, esto asociado con los regímenes de extracción observados en la Figura 5.6.

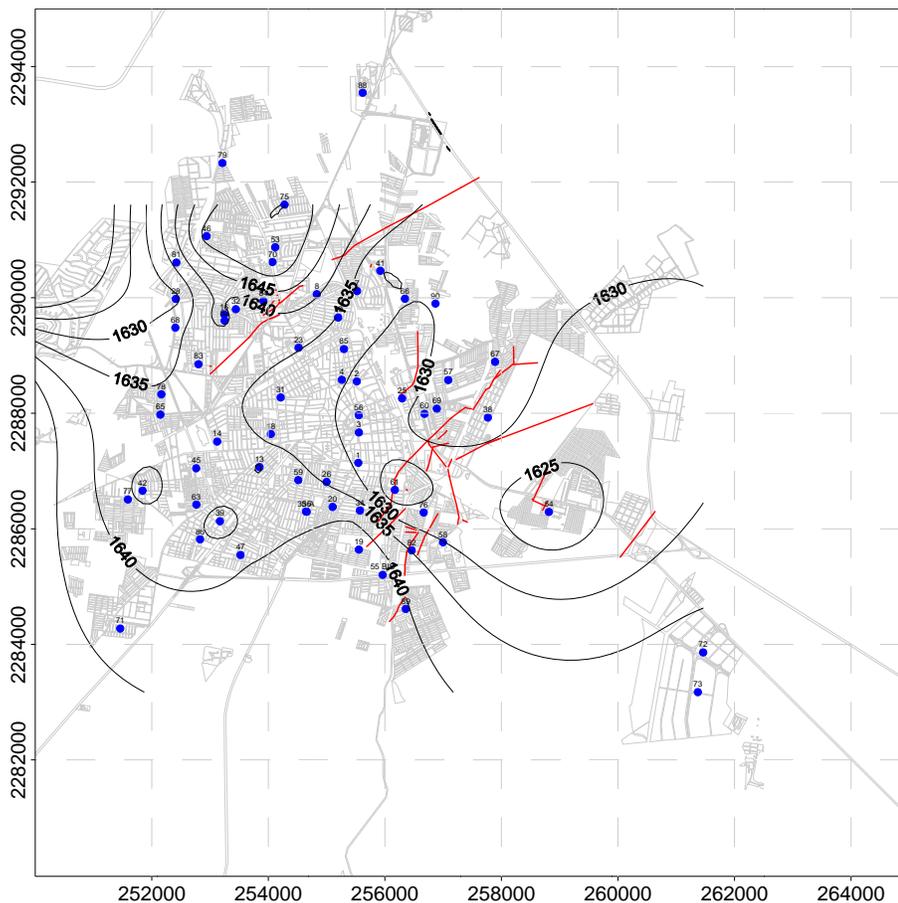


Figura 5.8. Configuración de nivel estático para 2005 en la ciudad de Irapuato.

La elevación de los niveles estáticos para el año de 2005 se ven incrementados en comparación con la distribución de los niveles piezométricos del 2003 (Figura 5.7). En el área urbana de Irapuato se pueden ver dos importantes conos de abatimiento, donde se localizan la

mayor cantidad de fallamientos y las llamadas fallas por subsidencia, en la parte sureste de la ciudad en los pozos 54 y 61, se observa que es ahí donde se tienen los abatimientos más bajos (Figura 5.8).

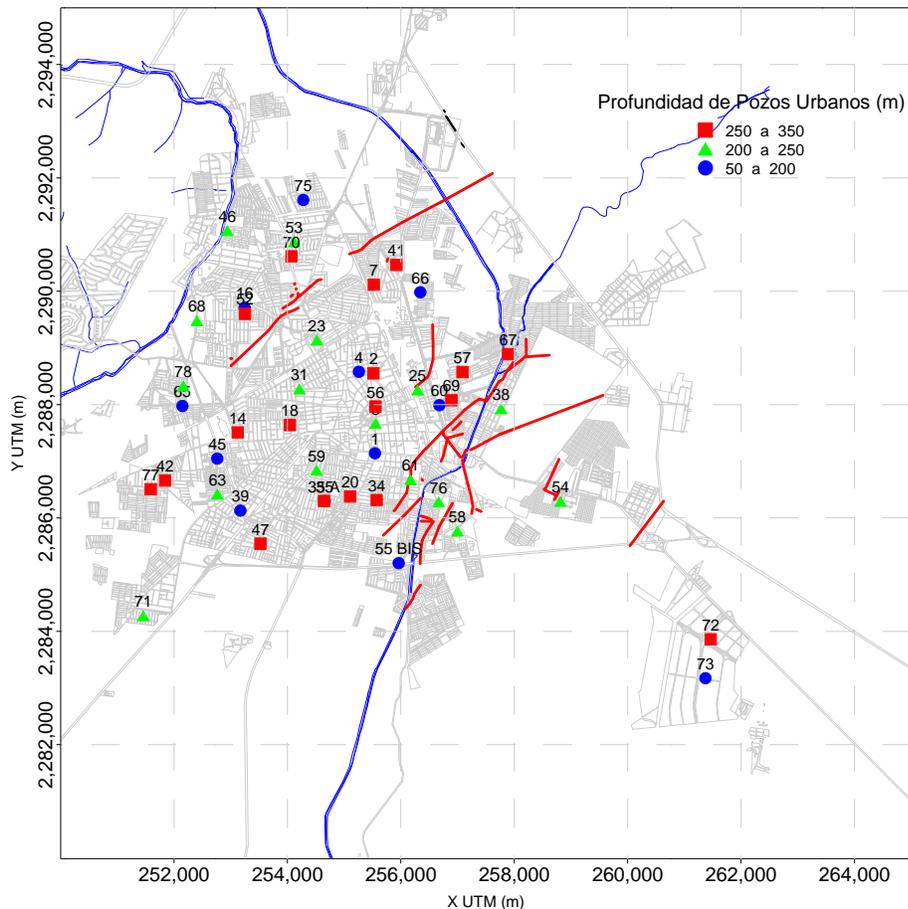


Figura 5.9. Distribución de la profundidad de pozos dentro de la zona urbana de Irapuato.

Comparando las dos configuraciones de niveles estáticos, es claro que guardan la misma distribución en general, pero con un abatimiento acumulado promedio de 2 m/año, con un abatimiento máximo de 8.66 m que corresponde al pozo 67 que se encuentra en la colonia Josefa Ortiz de Domínguez, y un nivel de recuperación de 5.99 m el cual corresponde al pozo 63 conocido como San Miguelito (valor que pudiera corresponder a un

error de medición, ya que no hay razón que explique una recuperación de esa dimensión).

Haciendo un análisis de las 2 configuraciones piezométricas en las zonas donde se presentan el fenómeno de subsidencia, la zona urbana de Irapuato es donde justamente se presentan los abatimientos más importantes, aunado a que en estos lugares los regímenes de extracción son los más elevados en la ciudad, y es en donde los pozos presentan profundidades entre 200 y 250 m.

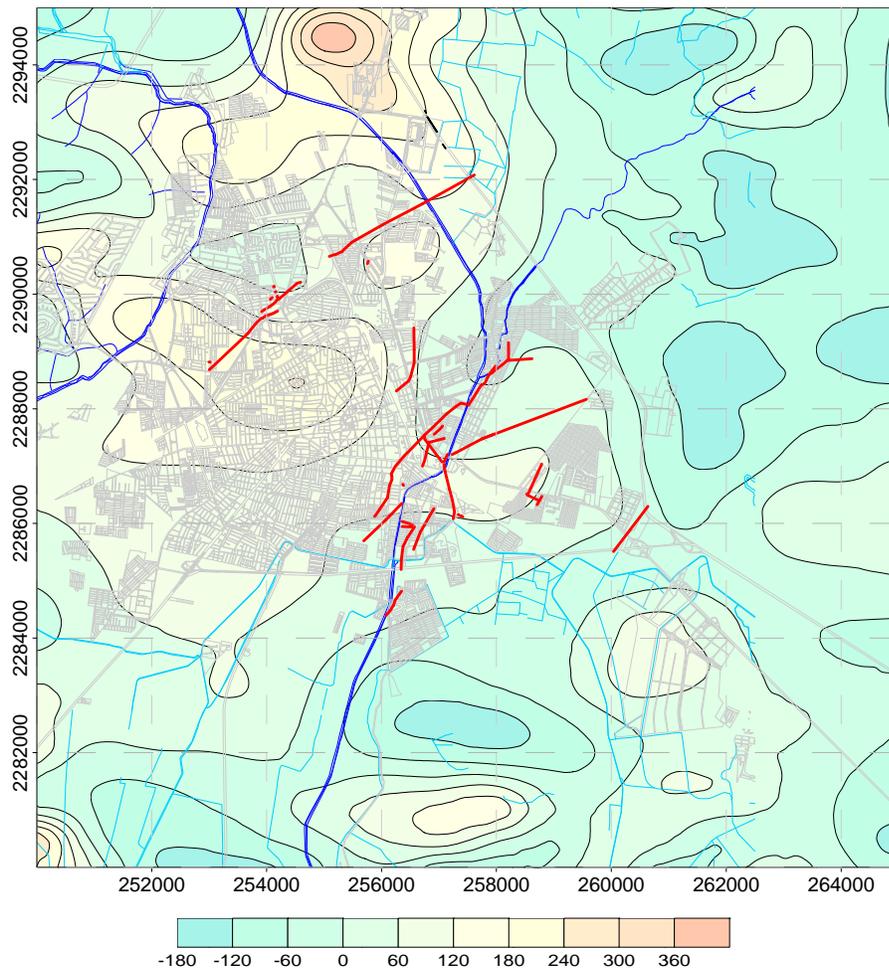


Figura 5.10. Distribución de anomalías magnéticas asociadas a la distribución de materiales arcillosos en la zona urbana. (modificado de SGM, 2005).

Mientras que hacia las márgenes de esta zona no se presenta debido en parte a menor extracción, menor profundidad y menor contenido de materiales deformables.

La influencia que presentan los pozos agrícolas en la parte superior del acuífero hace que los materiales de tipo arcillosos se despresuricen provocando los hundimientos del terreno.

También en la parte central deben de existir acuíferos colgados o semiconfinados por el material arcilloso cuya explotación provoca fallamiento de menor desplazamiento, es decir en estas parte el desplazamiento es menor a 1 cm/año, que a comparación con los medidos en la parte central de la zona 2.5 cm/año son mucho menores.

Resultados de estudios geofísicos como magnetometría pueden proporcionar información sobre estructuras en profundidad que pudieran haber controlado la depositación de material arcilloso. Las anomalías magnéticas (SGM, 2005) en la zona urbana de la ciudad de Irapuato manifiestan un alto magnético en las partes central de la zona, (Figura 5.10), este patrón no describe una relación directa con los hundimientos del terreno. Esta distribución irregular se puede deber a que dentro de la zona urbana el depósito de material arcilloso es irregular y el espesor de este varía de igual forma, sin embargo esto no descarta la existencia de fallas tectónicas que controlaron el depósito de materiales finos.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el área de estudio y los mecanismos de subsidencia en la zona urbana de la ciudad de Irapuato, la mayoría de los sistemas de fallas que se detectaron en la zona urbana se podrían explicar mediante el modelo 3 (Capítulo 2). Con la información disponible los fracturamientos y fallamientos se deben a los cambios

abruptos de los espesores de materiales finos que, junto con la explotación excesiva promueve la hidroconsolidación de los materiales.

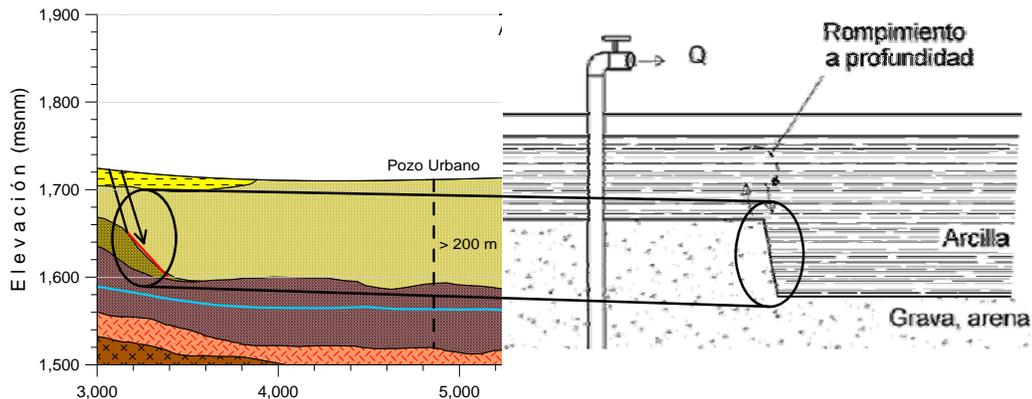


Figura 5.11. Formación de fallas del sistema Jacarandas/San Gabriel, Colonia La Hacienda y Pradera debido cambios bruscos de espesor dentro del acuífero, Sheng y Helm (1995).

En el sistema conformado por las fallas conocidas como Jacarandas/San Gabriel, Colonia La Hacienda y Pradera corresponde al mecanismo descrito por Sheng y Helms (1995), en este caso debido a la extracción de los pozos agrícolas emplazados dentro de materiales finos (Figura 5.11) y este corresponde al límite noroccidental de la zona urbana de Irapuato; aunque los otros sistemas se pueden explicar con este mismo modelo o proceso de formación, la relevancia de este sistema radica en que ubica la zona de cambio de espesor del material aluvial y por consiguiente el límite del material aluvial que se encuentra en contacto con el material volcánico procedente del cerro de las Arandas, este cambio de espesor se puede observar en la Figura 5.11.

Dentro de los sistemas Puente de Guadalupe, Plan Guanajuato y Desnivel/Solidaridad, están relacionados con irregularidades relacionadas con el cambio en la granulometría denotado por el contacto que existe con las areniscas y conglomerados que se encuentran dentro de la zona del campo militar, paleocanales y acuíferos colgados producto de la migración

del Río Guanajuato hacia el Oriente y donde se localiza un punto convergente entre las fallas Morelos/Río Guanajuato, Desnivel/Solidaridad, y Jardines de la Hacienda; que es la zona con mayor tasa de desplazamientos y la zona donde los espesores de material aluvial es mayor (Figura 5.12).

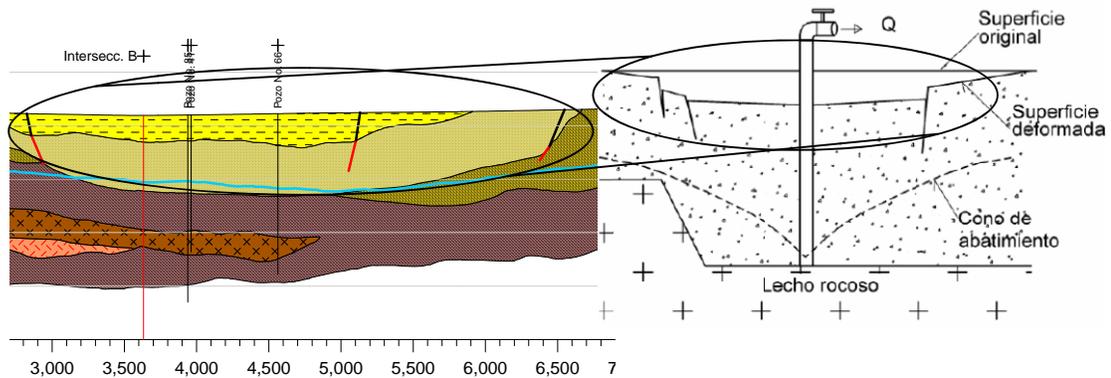


Figura 5.12. Mecanismo de generación de fallamientos en la parte central adaptado de Álvarez-Manilla (1999), a causa de cono de abatimiento.

Los sistemas de fallas de La Floresta, San Roque y Colón se relacionan con la dirección del cauce del Río Guanajuato, y de acuerdo con el perfil A–A’–A” y en esta zona existe un cambio de espesor del material fino.

El atlas de riesgo, FOSEG (2001) elaborado para las principales cabeceras municipales de Guanajuato, incluye para Irapuato fallas por subsidencia. Muchas de estas fallas fueron confundidas con fracturamientos, debidos a la mala cimentación y construcción de infraestructura. La identificación de los fracturamientos por Rodríguez y colaboradores en 2006, fue continuada en este trabajo. El mapeo presentado corresponde a las fallas detectadas hasta finales del 2007. Seguramente la extensión de algunas se ha modificado y otras no es que han aparecido si no que se han hecho más evidentes.

El patrón de fracturamiento observado en Irapuato tiene una dirección preferencial SW-NE, lo cual nos puede indicar un control estructural, este control no está directamente relacionado con el fracturamiento sino en la geometría de la cuenca, por lo tanto los materiales deformables como capas de arcilla o de arcillas arenosas se ve afectado en los cambios de espesor y distribución, es decir, que el control estructural incidió de manera indirecta en el depósito y en el espesor de los materiales finos y que estos por efecto de la explotación del agua subterránea sufren despresurización y se forma el fracturamiento por subsidencia; aunque existen otros factores que seguramente han intervenido en la orientación de las llamadas fallas, están no se contemplaron en los objetivos ni en el análisis de este trabajo.

Se ha demostrado que la subsidencia es originada por regímenes de extracción en sistemas acuíferos que involucran acuitardos o materiales plásticos. La despresurización de estos materiales provoca su compactación. En Irapuato los procesos geológicos que formaron el valle dieron lugar a grandes capas sedimentarias intercaladas por material fino. Adicionalmente los cauces de los ríos Guanajuato y Silao dieron origen al lago Eraitzicutzio que se fue desecando a principios del siglo XIX, su presencia ha sido reportada por algunos autores (Eling M. et. al., 2002). Su ubicación y límites

exactos son desconocidos, pero con los pocos documentos existentes y referencias orales de pobladores de la zona se ha podido proponer una geometría de acuerdo a la distribución y la geometría de las fallas dentro de la zona de estudio, la cual también es apoyada por información de estudios geotécnicos realizados en el área del ex-lago donde predominan limos y arcillas en la parte superficial contra reportes fuera del área del ex-lago donde solo muy someramente se reportan arcillas (el acceso a estos reportes fue restringido debido a los problemas sociales que ha originado el fracturamiento).

Las fallas están delimitando el área donde predominan arcillas que además coinciden con la ubicación de los pozos más profundos y de los de mayor extracción. Esto ha quedado evidenciado por las tendencias de los abatimientos piezométricos observados en la zona. De la información a la que se tuvo acceso, la piezometría de 2003 y 2005 muestran que en ese período se tienen abatimientos 2 m en promedio. Estos valores son realmente relativos ya que las piezometrías se hacen en redes de pozos de monitoreo propuestos por CEAG, los cuales son más bien de carácter regional, donde la ciudad de Irapuato es cubierta por tan solo por 9 pozos. En las configuraciones mostradas se incorporaron algunos valores de pozos agrícolas que en esos años el IGF monitoreó.

El control tectónico se hubiera podido corroborar con resultados gravimétricos, los cuales desafortunadamente no se han realizado en lo que corresponde al área urbana de la ciudad de Irapuato. Se pudo obtener un levantamiento magnetométrico efectuado por SGM en el año de 2005 en escala 1: 5,0000 donde las anomalías observadas nos permiten proponer un esquema claro de graben que permite explicar las fallas en términos de escalones tectónicos donde la deformación diferencial de materiales

heterogéneos puede llevar a su fracturamiento debido a la concentración de esfuerzos de cizalla (Carreón-Freyre 2005, 2006).

El mecanismo relacionado con la subsidencia diferencial vertical se ha relacionado con la variación de los espesores de depósitos compresibles cruzados por una falla vertical o otra estructura subsuperficial que abruptamente limita el potencial de compactación (Holzer, 1978; Bell, 1981; Bell and Price, 1991; Helm, 1994), este comportamiento del material fino se encuentra en el cambio de espesor localizada en la periferia de la ciudad de Irapuato.

Irapuato presenta una situación muy particular con respecto al número de pozos urbanos y agrícolas. Rodríguez y Lira (2008), ha reportado a esta, como una de las ciudades con mayor densidad de pozos agrícolas dentro de la mancha urbana en el país. La extracción urbana no es la única que ha provocado los abatimientos piezométricos observados en la mancha urbana. La extracción agrícola de los cerca de los 900 pozos agrícolas del municipio de los cuales cerca de 400 se encuentran en la mancha urbana y cuya extracción total se desconoce pero se estima de más del doble de la extracción urbana, ha contribuido a la despresurización de los materiales arcillosos.

La dirección de algunas fallas como Plan Guanajuato, Morelos/Río Guanajuato y Desnivel/Solidaridad seguramente está relacionada con volúmenes irregulares de material deformable de espesor y extensión variable como paleocanales causado por los ríos Guanajuato y Silao.

El incremento en la velocidad de subsidencia de áreas como puente Guadalupe y Juan Escutia (Figura 6.1) corresponde al mismo lineamiento asociado al incremento en la extracción en pozos del área y de pozos nuevos

que se han colocado en sus cercanías (Rodríguez et. al., 2006), también correlacionado con la teoría de consolidación unidimensional se ha adaptado para aplicación de problemas de hundimientos de terreno por explotación de agua subterránea Helm (1975, 1976). El modelo que considera que los hundimientos son causa de una despresurización como resultado de la disminución de los niveles piezométricos. Dicha despresurización ocasiona que la disminución de espacios vacíos dentro del material fino (acuitardo) intercalado por acuíferos.

La orientación de sistemas de fallas como colonia Olivos y Trébol (Figura 5.5) no han podido ser explicadas de manera satisfactoria sobre todo el primero ya que presenta una componente perpendicular a la falla principal.

La limitada información estratigráfica no permite postular más hipótesis sobre el origen de las fallas. Con todo y que en la ciudad se han perforado más de 550 pozos, solo se cuenta con 12 columnas litológicas cuya distribución no permite la elaboración de tres perfiles geológicos esquemáticos (Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4). Por lo menos la perforación de los 65 pozos urbanos requirió de estudios geofísicos (prospección geoelectrica). Al igual que la información litológica no fue posible obtener los sondeos eléctricos. La relevancia de identificar los factores que intervienen en el patrón de fracturamiento no solo es de orden académico para conocer la mecánica del fenómeno de subsidencia sino también social, puesto que el daño a la infraestructura de la ciudad de Irapuato recae de manera directa a la economía de la región.

Los sistema de fallas colonia la Hacienda y Pradera seguramente van a definir una sola gran falla. En el espacio en donde esta no se detectó (Figura 7.1) se han construido nuevos fraccionamientos algunos de los cuales ya presentan afectaciones.

Después de analizar todos los datos obtenidos en este trabajo y de acuerdo a los modelos conceptuales descritos en el capítulo 3 de subsidencia es claro que los fracturamientos que se originan en la zona urbana de Irapuato pueden obedecer a irregularidades en el lecho rocoso que a su vez dieron pie a que los depósitos del material fino fuesen irregulares haciéndose más profundos hacia la parte central de la ciudad, el modelo conceptual de este caso se muestra en la Figura 6.1 donde se observa que el fallamiento que se manifiesta en la parte superficial está relacionado con el escalón que se presenta en el cambio de espesores del material granular y los finos debido a explotación de agua subterránea del acuífero semiconfinado tiene una respuesta de hidrocompactación generando abruptamente los hundimientos diferenciales y por consecuencia el fallamiento.

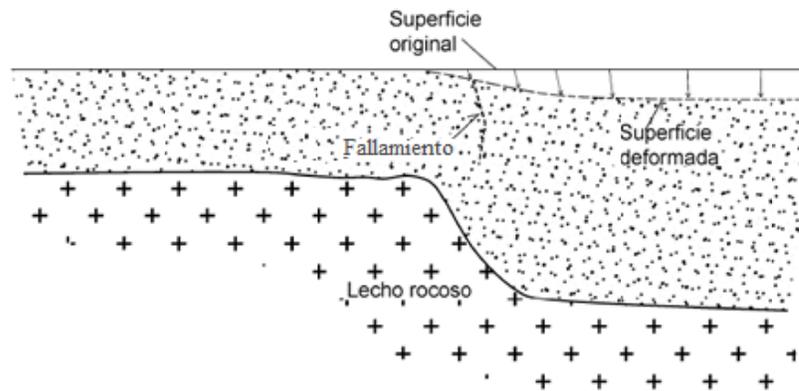


Figura 6.1. Mecanismo de generación de fracturas formado por cambios en espesores.

En este mismo contexto las fracturas que se encuentran en la periferia de la zona urbana se pueden explicar con el modelo conceptual propuesto por Sheng y Helm (1995), y mostrado en la Figura 6.2 donde se muestra que a partir de la formación de fallamientos superficiales el material experimenta un rompimiento a profundidad debido a estos cambios abruptos en espesores se genera en este caso deformación extensional.

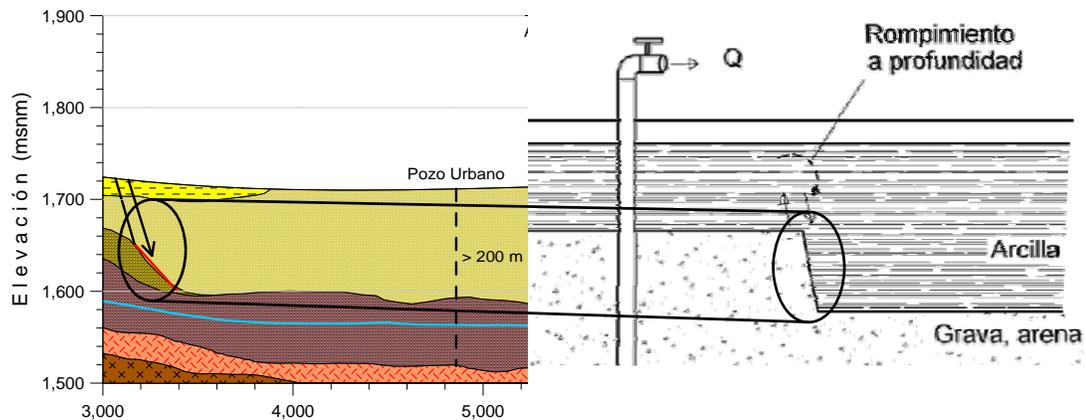


Figura 6.2. Formación de fallamiento debido a cambios bruscos de espesor dentro del acuífero, Sheng y Helm (1995).

Otro rasgo a notar de las fallas en la parte central de la ciudad de Irapuato es que se observa una zona de fracturamiento (Raisbeck y Pedler, 1985), es decir que no es solo un plano de fracturamiento si no que se trata de una zona de debilidad por lo que alrededor del desplazamiento principal se encuentran pequeñas fallas la cual se muestra en la Figura 6.3.

El modelo presentado por Álvarez-Manilla en 1999, considera una variación en la profundidad del nivel piezométrico, por lo tanto, los hundimientos diferenciales inducen el fallamiento en superficie, este mecanismo es observado en los sistemas Jacarandas/San Gabriel, Colonia La Hacienda, Pradera; así como Colonia Olivos y Trébol; y Plan Guanajuato.

Las hipótesis de que el mecanismo de acción y la geometría de las fracturas corresponde a pequeños depósitos locales de material arcilloso en la parte central de la cuenca, como lo que propone Álvarez-Manilla en 1999, donde la subsidencia es producto de una consolidación diferencial en un acuífero formado por rellenos aluviales depositados sobre un cauce, canal sepultado o fosa tectónica.

La subsidencia se generó por una combinación de deshidratación superficial y consolidación diferencial, donde la causa principal es la extracción de agua subterránea del acuífero heterogéneo; el otro considera una consolidación diferencial en un acuífero formado por rellenos aluviales.

En el fenómeno de hidrocompactación que genera la subsidencia presenta el efecto de retraso, este efecto no es tomado en cuenta, por lo que las afectaciones reales en la infraestructura, es por eso que dicho efecto se debe de incluir de manera importante en los estudios de subsidencia.

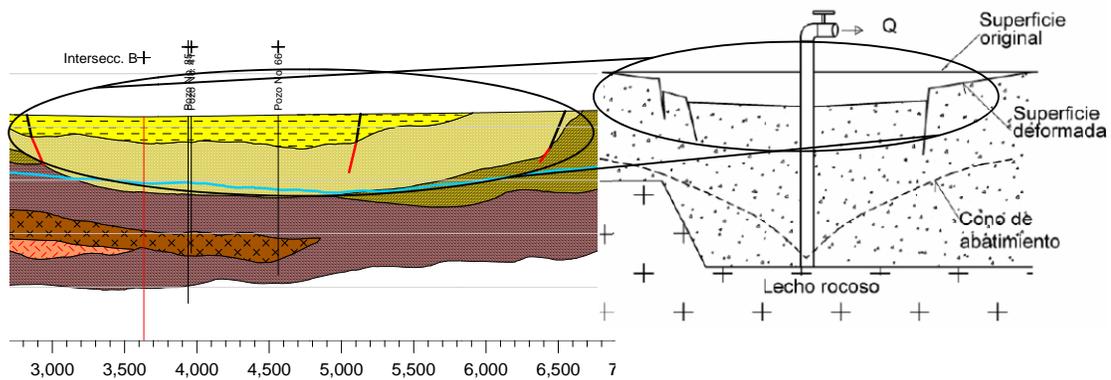


Figura 6.3. Mecanismo de generación de fallamientos en la parte central adaptado de Álvarez-Manilla (1999), a causa de cono de abatimiento.

La subsidencia y por ende el fracturamiento en Irapuato está más relacionado con la compactación de paquetes deformables relativamente superficiales, afectados por la extracción conjunta de pozos urbanos y agrícolas. La velocidad de subsidencia observada en el periodo de un año mediante estación total en Jardines de la Hacienda, 2 cm/año concuerda con lo observado en los desplazamientos acumulados en esa área hasta Juan Escutia donde en 10 años se tienen desplazamientos acumulados de 2.15 m al igual que en el área de puente de Guadalupe donde en el mismo periodo se tienen 2 m (Figura 7.1).

La subsidencia dentro de la ciudad de Irapuato está relacionada con la extracción de agua subterránea y se explica con el modelo 3 descrito en el capítulo 2 y desarrollado en el capítulo 5 dentro de las conclusiones. La extracción de agua dentro de la zona urbana esta mas asociada a los pozos agrícolas en la ciudad de Irapuato, los cuales tiene una profundidad menor que los urbanos, que junto con la distribución heterogénea de los materiales finos, arcillas y limos intercalados con arenas y conglomerados, (acuíferos colgados) dentro de la cuenca y la distribución del o los conos de abatimiento hace que se produzcan consolidaciones de los paquetes arcillosos y consecuentemente el hundimiento del terreno y la formación de los sistemas de fallamiento por subsidencia.

Los paquetes arcillosos que más se asocian a la subsidencia se relacionan con los depósitos lacustres derivados del lago Eraitzicutzio, lago que fue desecado a finales del siglo pasado con propósito de desarrollos agrícolas y posteriormente para la expansión urbana de la ciudad de Irapuato.



Figura 7.1. Sistema de Falla de Juan Escutia y Falla de Puente de Guadalupe.

Otros depósitos de materiales finos están íntimamente relacionados con los meandros y los cauces de los ríos Guanajuato y Silao que cruzan la mancha urbana. Aunque no se han detectado como en el caso de la ciudad de Salamanca deben existir paleocanales con depositaciones de diferente granulometría, lo cual explica algunos de los sistemas de fallas encontradas.

Al igual que Rodríguez et. al., 2006, se propone que la ciudad de Irapuato cuente con sistemas de monitoreo *in situ* y con estudio interferométricos para conocer cuál es el origen y la situación de los hundimientos dentro de la

mancha urbana y sus alrededores, puesto que los en la zona de estudio las fallas por subsidencia presentan diferentes orígenes y mecanismos.

Según Michel Manciaux (2003), la resiliencia es la capacidad de una persona o grupo para seguir proyectándose en el futuro a pesar de acontecimientos desestabilizadores, de condiciones de vida difíciles y de traumas a veces graves. La población afectada por la subsidencia ha desarrollado capacidades de adaptación que deberían de estudiarse. No les importa el riesgo, quizás más por su desconocimiento, confían en que el proceso se detendrá o proponen ingeniosas alternativas.

En algunas partes de la república donde ocurren fenómenos de subsidencia, se pueden observar casas en donde entre la cocina y el comedor existe un pequeño patio inclinado, o casas en donde se llega por escalones rústicos de la sala al comedor. Si la subsidencia es provocada por la extracción de agua subterránea, se puede tratar de controlar mediante una extracción planificada. La extracción controlada del agua subterránea no evitará que la subsidencia continúe, pero puede lograrse que el terreno se hunda de manera uniforme evitando daños futuros a la infraestructura y dado lo reducido de las velocidades de hundimiento (mm por año), la población no se percata del proceso de subsidencia. Sistemas de monitoreo de hundimientos debe de ser una práctica común al igual que la utilización de mapas de riesgo elaborados basados en resultados de métodos interferométricos.

La gran dependencia de agua subterránea para abastecimiento público urbano, industria y riego agrícola, hace prácticamente que sea imposible suspender la extracción y entre otras cosas no existen fuentes alternas de agua en las ciudades afectadas. Los municipios deben consecuentemente incorporar la subsidencia en los programas de ordenamientos territoriales, restringiendo la construcción en zonas de fallamiento o fracturamiento.

En Irapuato la población aún no genera actitudes de resiliencia, mientras que algunas personas reparan constantemente sus viviendas, otras se las ingenian para evitar derrumbes. Las autoridades municipales no discuten con la población medidas preventivas o la cancelación de obras en las áreas afectadas.

Si la población va a estar conviviendo con la subsidencia entonces debería de ser informada de manera oficial y entender los riesgos mediante programas informativos que deben de ser propuestos por expertos y seriamente implementados.

Se ha propuesto y analizado la recarga artificial de acuíferos como una solución, pero este tipo de unidades arcillosas (acuitardos) no se pueden recargar, aunque puede ser una alternativa en aquellos casos en donde las unidades deformables permitan la incorporación de agua o tengan unidades geológicas subyacentes factibles de ser recargadas.

Existe un compromiso entre los encargados de obras de otorgar permisos de construcción a la población, pero si la subsidencia no es evidente, los estudios de mecánica de suelos requeridos para los permisos no la detectarán. Los grupos de Protección Civil, tampoco tienen claro si la subsidencia es un desastre o un fenómeno natural.

Es necesario legislar sobre el tipo y nivel de apoyo que se debe dar a los afectados por subsidencia e incorporar información técnica como mapas de riesgos o de vulnerabilidad acuífera en los organismos dedicados al agua, al medio ambiente, a la protección civil o la obra e infraestructura urbana.

Además de la falta de información confiable, existen vacíos legales que deberían ser cubiertos para mitigar el impacto económico que tiene la

subsistencia. Si se legisla sobre el tipo de construcción en zonas de alta, también debería de reglamentarse sobre los riesgos por subsidencia o las construcciones en zonas de riesgo geológico. En algunas ciudades se han elaborado algunos documentos como Atlas de Riesgos, como en Irapuato o la Cd. de México. Atlas que llegan a incluir mapas con fallas y fracturas del terreno, pero esta información no permea hacia la población que vive en zonas de riesgo.

Las afectaciones a la obra pública se trasminan a la población. Las calles y banquetas se desnivelan. Los costos de la renivelación periódica de calles son elevados, costos que finalmente recaen sobre la población.

Las fracturas y fallas que se observan en superficie no solo afectan la infraestructura visible sino también la subterránea como sótanos, cimentaciones, tuberías, drenajes y poliductos.

Cuando las fallas interceptan poliductos se pueden producir derrames de hidrocarburos en el subsuelo como ya ha ocurrido. Los edificios de uso público con estructuras debilitadas por la subsidencia deben ser considerados en riesgo. Estos son más fácilmente afectables por sismos o inundaciones.

Si bien el propósito de este trabajo es demostrar que la subsidencia la provoca la extracción de aguas subterránea, todo apunta a ese sentido. Una de las hipótesis de partida es que la orientación preferencial de las fallas estaba controlada tectónicamente. No se encontraron suficientes evidencias para soportar tal hipótesis.

- Aguilar L. A., Ortega A., Lugo-Hupb J. Ortiz D., 2006. Análisis numérico acoplado de los desplazamientos verticales y generación de fracturas por extracción de agua subterránea en las proximidades de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 23, núm. 3, 2006, pp. 247-261.
- Alaniz-Álvarez S. A., Nieto-Samaniego Á. F., Reyes-Zaragoza M. A., Orozco-Esquivel Ma. T., Ojeda-García Á. C., y Vassallo L. F., 2001. Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 18, núm. 2, pp. 129-148.
- Alaniz-Álvarez S. A. y Nieto-Samaniego Á. F. 2005, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Tomo LVII, núm. 1, pp. 65-82.
- Álvarez-Manilla A., 1999; Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro. Tesis de Maestría en Ciencias (Mecánica de Suelos), Universidad Autónoma de Querétaro, México.
- Aranda-Gómez, J. M., Aranda-Gómez, J. J., 1986. Análisis de agrietamiento de la Ciudad de Aguascalientes: Aguascalientes, Universidad Autónoma de Aguascalientes Reporte Interno (inédito) pp. 104.
- Aranda-Gómez J. J., Aranda-Gómez J. M. y Nieto-Samaniego Á. F., 1989. Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozoico de la Sierra de Guanajuato y la parte meridional de la Mesa Central: Universidad Nacional Autónoma de México: *Revista Instituto de Geología*, Vol. 8, Núm. 1, pp. 33-46.
- Ávila-Olivera J. A., 2004. Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con procesos de Subsistencia-Creep-Falla, caso: la ciudad de Morelia, Michoacán México: Querétaro, Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, *Tesis de Maestría*, pp. 234.
- Ávila-Olivera J. A., Garduño-Monroy V. H., 2008. A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico: *Engineering Geology*, Vol. 100, Núm. 1-2, pp. 69-81.
- Ban Masao, Hasenka Toshiaki, Delgado-Granados H., y Takota Nobuo, 1992. K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico: *Geofísica international (México)*, v. 31, num 4, pp. 467-474.
- Bankher K. A. and Al-Harhi A., 1999. Earth Fissuring and Land Subsidence in Western Saudi Arabia: *Natural Hazards 20*: pp. 21-42.
- Bell J. W., 1981. Subsidence in Las Vegas Valley. Nevada Bureau of Mines and Geology, Bulletin 95, 84 pp.

- Bell J. W., Price J. G. 1991. Subsidence in Las Vegas Valley, 1980–91. Nevada Bureau of Mines and Geology, Final Project Rep 10, 9 plates, unpaginated
- Biot M. A., 1941. General theory of three-dimensional consolidation. J Appl Phys 12:155–164.
- Bousinesq J., 1876, Essai théorique sur l'équilibre d'élasticité des massifs pulvérulents et sur la poussée des terres sans cohésion : Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences. Paris. T. 77, 1521-1525.
- Burbey T. J., 2002. The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. Hydrogeology Journal 10:525–538.
- Carpenter M. C., 1999. Earth-fissure movements associated with fluctuations in ground-water levels near the Picacho Mountains, south-central Arizona, 1980–84. US Geol Surv Prof Pap 497-H, 49 pp.
- Carreón-Freyre D. C., Cerca M., Luna-González L. y Gámez-González F. J., 2005. Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 22, Núm. 1, pp. 1-18.
- Carreón-Freyre D. C., Hidalgo-Moreno C. M., Hernández-Marín M., 2006, Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México: *Boletín de la Sociedad Geológica* Tomo LVII, núm. 2, pp. 237-250.
- Chin Hsi Liu, Yii Wen Pan, Jyh Jong Liao, Chen Tair Huang and Shoung Ouyang, 2004. Characterization of land subsidence in the Choshui River alluvial fan, Taiwan. *Environmental Geology*, Vol. 45, Num. 8, pp. 1154-1166.
- CONAGUA, 2002. Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Irapuato–Valle, estado de Guanajuato.
- Eling McIntocht H., Sánchez Rodríguez M. y Martínez García C. 2002. Prime informe de reconocimiento arqueológico del sistema de riego de Irapuato, Silao, Guanajuato basado en los mapas de 1792 a 1799, pp. 83-100 en Los estudios del agua en la Cuenca Lerma-Chapala-Santiago II, *El Colegio de Michoacán A.C, Universidad de Guadalajara. Editores Durán Juárez Juan Manuel, Boehm Schoendube Brigitte, Sánchez Rodríguez Martin y Torres Rodríguez Alicia*, 2002., pp. 345.
- Echegoyén-Sánchez J., Romero-Martínez S., Velázquez-Silva S., 1970, Geología y yacimientos minerales de la parte central del Distrito Minero de Guanajuato, México: *Consejo de Recursos Naturales No Renovables*, Boletín, 75, pp. 36.
- FOSEG, 2001. Atlas de Riesgos del Estado de Guanajuato. Coordinación Estatal de Protección Civil. Fondo de Seguridad. -Secr. de Gobierno, Edo. de Guanajuato, pp. 145.
- Freda, J.: 1988, Collapse of loess upon wetting, *Engng Geol.* 25, 263–269.

- Gambolati G, Freeze R. A., 1973. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 1.Theory. *Water Resourse Research* 9: pp. 721–733.
- Gambolati G, Gatto P, Freeze R. A., 1974. Mathematical simulation of the subsidence of Venice: 2. Results. *Water Resourse Research* 10: pp. 563–577.
- Galloway D., Jones D. R. e Ingebritsen S. E. eds., 1999; Land subsidence in the United State: Circular 1182, U. S. Geological Survey. Part IV, The Role of Science.
- Garduño-Monroy V. H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Torres G. M., 2001. Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18 (1), pp. 37–54.
- García E., 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen; para adaptarlo las condiciones de la República Mexicana, Instituto de Geografía 2ª ed., Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF. 246 p.
- García Reynoso A. S., 2007 “Visión geológica del desarrollo urbano en Irapuato”, Sol de Irapuato, 19/noviembre/07.
- Geofísica de Exploraciones GUYSA, S.A. de C.V. (CEASG), 1998. Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Irapuato–Valle de Santiago: Documento del plan estatal hidráulico de Guanajuato, México.
- Glowacka E., Sarychikhina O., Suarez F., Nava F., Farfan F., Cossio Battani G. D., Guzman M., Guzman M., 2007. Aseismic Slip Observed on the Faults in Mexicali Valley, Baja California, Mexico: *USGS Joint Assembly*, Acapulco, México.
- Gross, W. H., 1975. New ore discovery and source of silver–gold veins, Guanajuato, México: *Economic Geology*, 70, pp. 1175–1189.
- Helm D. C., 1975. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California: (1) Constant parameters. *Water Resourse Research* 11: pp. 198–12.
- Helm D. C., 1976. One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pixley, California: (2) Stress-dependent parameters. *Water Resourse Research* 12: pp. 121–30.
- Helm D. C., 1994. Hydraulic forces that play a role in generating fissures at depth. *Bull Assoc Eng Geol* 31:293–302.
- Holzer T. L., 1978. Documentation of potential for surface faulting related to ground-water development in Las Vegas Valley, Nevada. US Geol Surv Open-File Rep 78-79, 11 pp.
- Holzer T., 1980. Faulting caused by groundwater level decline, San Joaquin Valley, California. *Water Resources research*, Vol 16 No. 6 1065-1070 pp.

- IMTA, 2003. González H. L., Herrera G., Cardona A., Mora J., Júnez H., Becerra L., y Gutiérrez Carlos. Estudio de contaminación difusa en el agua subterránea en el Acuífero Irapuato Valle, Gto. IMTA, CONAGUA. Reporte técnico, pp. 323.
- Jachens C. R. y Holzer L. T., 1979; Geophysical investigations of ground failure related to ground water withdrawal Picacho basin Arizona: *Ground Water*, vol. 17, no. 6. p. 574-585.
- Jachens C. R. y Holzer L. T., 1982; Differential compaction mechanism for earth fissures near Casa Grande, Arizona: *Geological Society of American Bulletin*, v. 93, p. 998-1012.
- Juárez-Badillo, E., Rico-Rodríguez. A., 2002, *Mecánica de Suelos*, Tomo I. Fundamentos de mecánica de suelos: México, Editorial Limusa, 642 p.
- Labarthe-Hernández G., Tristán-G. M., Aranda-G. J., 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Edo. de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, *Folleto Técnico*, 85, pp. 208.
- Larson J. K., Basagaoglu H., Marino M. A., 2001. Prediction of optimal safe groundwater yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model: *Journal of Hydrology*, 242: pp. 79–102.
- Le K. L. y Shen C. K., 1969; Horizontal movements related to subsidence. *Journal of the soil mechanics and foundation Division, Proceedings of the American Society of the Civil Engineers*.v 95, no. 1, pp. 139-166
- Lermo-Samaniego J., Nieto Obregón J., Zermeño M., 1996. Fault and fractures in the valley of Aguascalientes, Preliminary microzonification. Paper 1651 in the 11<sup>th</sup> *World Conference on Earthquake Engineering*, Amsterdam.
- LEHGGS (Laboratory of Engineering and Hydrological Geology and Geophysical Survey, Liege university, Belgium, Institute of geological survey of Belgium) and GCSER (Geological Center of Shanghai Economic Region), 1989. Study on the Quaternary geology, hydrogeology, engineering geology and mathematical model of land subsidence of Yangtze Delta of Shanghai (in Chinese). LEHGGS/GCSER, Liege/Shanghai.
- Martínez Murillo P., García Martínez M. y Arellano Guerrero J. C., 2005. Distribución de metales y iones mayores en la subcuenca del río turbio, Guanajuato. Consideraciones genéticas. *AGM V Congreso de aguas subterráneas Hermosillo, Sonora*. Servicio Geológico Mexicano (antes Consejo de Recursos Minerales).
- Martínez-Reyes J., Nieto-Samaniego A. F., 1990. Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista Instituto de Geología*, Vol. 9, Núm. 1, pp. 33–50.
- Martínez-Reyes J., 1992. Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato: México. Universidad Nacional Autónoma de México: *Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México* serie 1:100,000.

- Michel Manciaux, 2003. La resiliencia: resistir y rehacerse. ISBN 84-7432-969-8, pp. 103-110.
- Morán D., Escolero Ó., Alcocer J., 2004. El agua en México vista desde la academia: *Academia Mexicana de Ciencias*, pp. 441.
- Nieto-Samaniego Á. F., 1990, Fallamiento y estratigrafía cenozoicos en la parte sudoriental de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, *Revista Instituto de Geología*, Vol. 9, pp. 146-155.
- Orozco-Esquivel M. T., Nieto-Samaniego Á. F., Alaniz-Alvarez S. A., 2000. Procesos de fusión cortical en desequilibrio asociados a extensión Oligocénica en la Mesa Central: *Geos, Unión Geofísica Mexicana*, Vol. 20, pp. 306. (Resumen).
- Pacheco M. Jesús y Arzate Jorge A., 2002. Configuración del basamento y agrietamientos superficiales del suelo en el valle de Querétaro. *Unión Geofísica Mexicana*, Reunión Anual, Resúmenes. Geos.
- Pasquaré G., Ferrari L., Garduño V. H., Tebaldi A. y Vezzoli L., 1991. Mapeo Geológico del Sector Central del Cinturón Volcánico Transmexicano, en los estados de Guanajuato, Michoacán, México. Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Milano Italia.
- Poland J. F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: *Studies and Reports in Hydrology*. Unesco, Paris, pp. 305.
- Pérez Venzor J. A., Aranda-Gómez J. J., McDowell F. y Solorio-Munguía J. G. 1996. Geología del Volcán Palo Huérfano, Guanajuato México, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* Vol. 13, Núm. 2, pp. 174-183.
- Raisbeck D. y Pedler I. V., 1985; Settlement prediction and monitoring in an area of regional subsidence: In International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 11o Proceedings: San Francisco, Soil Mechanics and Foundation Engineering, p. 2231-2234.
- Ramos-Arroyo Y. R., Prol-Ledesma R. M. y Siebe-Grabach C. D., 2004. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Posibles escenarios geoquímicos para los residuos mineros, *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 21, Núm. 2, pp. 268-284.
- Ramos-Leal José A., Durazo J., González-Morán T., Juárez-Sánchez F., Cortés-Silva A., y Johannesson K. H., 2007. Evidencias hidrogeoquímicas de mezcla de flujos regionales en el acuífero de La Muralla, Guanajuato: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 24, Núm. 3, pp. 293-305.
- Rodríguez R., Armienta M. A., Morales P., Silva J. T., Hernández H., 2006. Evaluación de vulnerabilidad acuífera del Valle de Irapuato, Gto: *Instituto de Geofísica, Reporte técnico*, pp. 91.

- Rodriguez R., Lira J., 2008. A risk analysis of abstraction-related subsidence based on roughness analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Volume 67, Number 1: 105–109.
- Rogers, C., Dijkstra, T., and Smalley, I.: 1994, Hydroconsolidation and subsidence of loess. *Studies from China, Russia, North America and Europe (in memory of JAN SAJGALIK)*, *J. Engng Geol.* 37, 83–113.
- Rojas E., Arzate J. y Arroyo M., 2002; A method to predict the group fissuring and faulting causes by regional groundwater decline: *Engineering Geology*, no. 65, p. 245-260.
- Roobol M., Shouman S., and Al Solami A., 1985. Earth tremors, ground fractures, and damage to buildings at Tabah (27/42C). Saudi Arabian Deputy Ministry for Mineral Resources Technical Record DGMR-TR-05-4.
- Sánchez Rodríguez M. & Eling H., 2007. *Cartografía Hidráulica de Guanajuato*. El Colegio de Michoacán, CONCyTEG, Michoacán. 417 pp.
- SGM, 2005. Carta magnética de campo total F14-C62 Irapuato, escala 1:50,000.
- SGM, 2005. Carta magnética de campo total F14-C63 Salamanca, escala 1:50,000.
- SGM, 2005. Carta geológico-minera F14-10 Querétaro, escala 1:50,000.
- Sheng Z. y Helm D. C., 1995. Conceptual models or earth fissuring in Las Vegas Valley, Nevada USA. *IAHS Publ. No. 234*: pp. 381–387
- Shi X. Q., Xue Y. Q., Wu J. C., 2006. Study on soil deformation properties of groundwater system in Changzhou area (in Chinese). *Hydrogeol Eng Geol* 33: pp. 1–6.
- Shi X. Q., Xue Y. Q., Ye S. J., 2007. Characterization of land subsidence induced by groundwater withdrawals in Su-Xi-Chang area, China. *Environ Geol* 52: pp. 27–40.
- Terzaghi K., 1925. Principles of soil mechanics, IV, Settlement and consolidation of clay, *Eng. News Rec.*, 95(3), pp. 874–878.
- Terzaghi K., 1956, *Theoretical Soil Mechanics*: New York, *John Wiley and Sons*, pp. 528.
- Trejo-Moedano A. y Martinez-Baini A., 1991; Agrietamiento de suelos zona Querétaro, en *Agrietamientos de suelos*, Editado por la Sociedad Mexicana de Mecánica de suelo, México, p. 67-74.
- Trujillo-Candelaria J. A., 1985. Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto., *Reunión sobre Asentamientos Regionales, México*, D.F., Sociedad Mexicana de Suelos, Asociación Geohidrológica Mexicana, pp. 1–2.

- Trujillo-Candelaria J. A., 1991. Fallamiento de terrenos por efecto de la sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Guanajuato, México. *XXIII Congress of the Association of International Hydrologists, Sobreexplotación de acuíferos: España*, pp. 175–178.
- Wilson A. M. and Gorelick S., 1996. The effects of pulsed pumping on land subsidence in the Santa Clara Valley, California. *Journal of Hydrology* 174, pp. 375-396.
- Xue Y. Q., Zhang Y., Ye S. J., 2005. Land subsidence in China. *Environmental Geology* 48: pp. 713–720.