



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Ingeniería Civil

MONITOREO Y PREDICCIÓN DE AGRIETAMIENTOS POR SUBSIDENCIA
 EN LA FALLA 5 DE FEBRERO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Ingeniero Civil

Presenta:

Gilberto Estrella Ramírez

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

SINODALES

Dr. Omar Chávez Alegría

Dir. Tesis.

Firma

Dr. Eduardo Rojas González

Sinodal

Firma

Dr. Gpe. Moisés Arroyo Contreras

Sinodal

Firma

Dra. Ma. Del la Luz Pérez Rea

Sinodal

Firma

Dr. Aurelio Domínguez González

Director de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
 Querétaro, Qro.
 21 de Febrero de 2012
 México.

RESUMEN

El fenómeno de subsidencia ocurre por la excesiva explotación del agua subterránea, lo cual se convierte en un problema cuando se suman estratos de suelo firme o roca irregulares, lo que ocasiona que el suelo de la superficie se deforme y es el causante de que ocurra una falla por subsidencia. En esta investigación se realiza una comparación del diferencial vertical medido in situ a través del tiempo, por dos métodos: Asentamiento por Esfuerzos Efectivos, que toma en cuenta el cambio en los esfuerzos efectivos en la masa de suelo, y el método de Sustentación Hidráulica corregido (Pacheco, 2007), que trata los asentamientos sobre suelos no saturados. Ambos métodos se adecuan a graficas de asentamiento-tiempo; y con base a esto se realiza una predicción del asentamiento relativo esperado en Valle de Querétaro, en un área aproximada a 170km^2 , en particular la Falla 5 de Febrero que se encuentra ubicada entre Jardines de la Hacienda y la calle Epigmenio González en la ciudad de Querétaro, También se estiman valores de tiempo probable para los años 2020, 2030 y 2050, además de que se actualizan los datos de asentamiento y abatimiento del acuífero de los puntos de la falla mencionados hasta Diciembre del año 2011, lo cual se puede tomar en cuenta en trabajos de edificación existentes e investigaciones futuras.

INDICE GENERAL.

<i>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</i>	<i>4</i>
1.1 Objetivo Principal.....	5
1.2 Objetivos Secundarios.....	5
1.3 Hipótesis.....	5
1.4 Descripción del problema.....	5
1.5 Justificación.....	8
1.6 Descripción de la temática de tesis.....	10
<i>CAPITULO 2. ANTECEDENTES.....</i>	<i>12</i>
2.1 Introducción.....	12
2.2 Modelo de Esfuerzos Efectivos (Terzaghi, 1956).....	16
2.3 Modelado Analítico y Numérico de los hundimientos.....	17
2.4 Geología del Valle de Querétaro.....	23
2.5 Modelo analítico para la determinación de la subsidencia, en función del nivel variable de aguas subterráneas.....	34
2.6 Modelo de hundimientos por pérdida de Sustentación Hidráulica (Pacheco, 2007).....	41
2.7 Modelos conceptuales de generación de agrietamientos en suelos No Saturados... ..	44
<i>CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO.....</i>	<i>48</i>
3.1 Ley de Hooke.....	48
3.2 Método de Sustentación Hidráulica corregido.....	50
<i>CAPITULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS.....</i>	<i>52</i>
4.1 Materiales.....	52
4.2 Lecturas del Diferencial Vertical en la Falla 5 de Febrero.....	53
4.3 Nivel de Abatimiento del agua de la red piezométrica del Valle de Querétaro (CEA, 2011).....	55
4.4 Método de asentamientos por Esfuerzos Efectivos (Terzaghi, 1956).....	67
4.5 Asentamientos para suelos no saturados, variante de Pacheco (2007).....	82
4.6 Predicción de agrietamientos en la Falla 5 de Febrero.....	92
<i>CAPITULO 5. RESULTADOS.....</i>	<i>100</i>
<i>CAPITULO 6. CONCLUSIONES.....</i>	<i>108</i>
<i>ANEXOS.....</i>	<i>111</i>
<i>REFERENCIAS.....</i>	<i>117</i>

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

El contenido de este trabajo se encuentra encaminado al estudio de los asentamientos en el Valle de Querétaro debidos a la extracción excesiva de agua, también llamado déficit hidráulico, el cual es frecuente en aquellos lugares semidesérticos en donde la principal fuente de obtención de agua potable proviene del subsuelo. Existen muchos trabajos que soportan que el exceso de extracción provoca un cambio en los esfuerzos efectivos y por tanto un incremento en el “peso volumétrico aparente” del material, lo que induce una compactación del material que aunado a un lecho rocoso más rígido y con irregularidades provoca asentamientos diferenciales y por tanto fisuras o grietas en la superficie del suelo (Pacheco, 2007).

Para efectos de este trabajo se tomó en cuenta un área en donde debido a la subsidencia se detectó una falla en particular, la cual se ubica entre Epigmenio González y la colonia Jardines de la Hacienda (Figura 1.1) en la ciudad de Querétaro, que es donde se observa un diferencial vertical a simple vista. Dicho diferencial vertical se encuentra entre 0.30 – 1.20 m, y es en este lugar donde se observan los mayores daños estructurales, principalmente en casas habitación, vialidades y drenajes. La presente investigación se enfocó al estudio de asentamientos a largo plazo en años en base a mediciones en el sitio a fin de compararla con asentamientos calculados con el Método de Asentamiento por Esfuerzos Efectivos, el cual toma en cuenta las diferencias de abatimiento del nivel de aguas subterráneas a través del tiempo en un periodo de 1970 a 2011; así como el modelo de sustentación hidráulica corregido (Pacheco, 2007), que toma en cuenta el incremento en el peso volumétrico aparente del material, tomando en cuenta el asentamiento para suelos no saturados y el abatimiento del nivel de aguas subterráneas.

1.1 OBJETIVO PRINCIPAL.

Revisar el proceso de subsidencia en el Valle de Querétaro y estimar asentamientos futuros en el Valle de Querétaro por subsidencia, con base a un análisis de correlación entre el método de asentamientos por Esfuerzos Efectivos y por el método de Sustentación Hidráulica corregido (Pacheco, 2007) comparadas con mediciones de asentamientos relativos verticales medidos en sitio.

1.2 OBJETIVOS SECUNDARIOS.

-Revisar el proceso de subsidencia por análisis en el incremento de esfuerzos efectivos presentado por Terzaghi (1956), y el asentamiento por el Método de Sustentación Hidráulica corregido (Pacheco 2007).

-Presentar los asentamientos relativos por medio de mediciones topográficas y abatimiento del nivel estático del agua entre el periodo de tiempo que comprende de 1970 a Diciembre de 2011.

1.3 HIPÓTESIS.

Es posible estimar el asentamiento relativo a través del tiempo por medio de la historia de asentamientos en la falla 5 de Febrero comparado paramétricamente con los métodos de Esfuerzos Efectivos (Terzaghi, 1956) y Sustentación Hidráulica corregido (Pacheco, 2007) y predecir bajo estas teorías el probable asentamiento a Futuro.

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

El fenómeno de fallamiento y agrietamiento de los suelos causante de daños a construcciones, edificios, drenajes, ductos de gas y pavimentos, es cada vez más conocido en México, ya que debido a la extracción de petróleo, gas y agua, ocurre un asentamiento, que en combinación con la Geología de sitios con depósitos aluviales con lechos rocosos muy discontinuos como es

el caso de las Ciudades de Celaya, Morelia, Irapuato, San Luís Potosí, Ciudad de México y Querétaro (Figura 1.1), conduce a que estos fallamientos y agrietamientos se hagan obvios en la superficie (Chávez, 2008).



Figura 1.1 Mapa de la república mexicana donde se muestra en rojo las zonas susceptibles de que se generen hundimientos y fallamientos por extracción del agua subterránea. Adaptado de Pacheco, (2007).

Para el caso particular del estado de Querétaro, de acuerdo a la existencia de espesores importantes de sedimentos aluviales y lacustres y a los volúmenes de explotación del agua subterránea, Pacheco (2007) elaboró una carta, en la cual se identifican cuatro zonas donde se presentan las condiciones para que se desarrolle el fenómeno, las zonas corresponden a los valles de Querétaro, de Amazcala, de San Juan del Río y de Tequisquiapan (Figura 1.2). Hasta la fecha sólo se ha reportado el fenómeno en el valle de Querétaro, no obstante en el valle de Amazcala existe un espesor de depósitos aluviales de 270 metros en la zona de San Vicente Ferrer, lo que lo convierte en la zona con mayor potencial para desarrollar hundimientos si el nivel piezométrico se ve abatido en los próximos años (Pacheco, 2007).

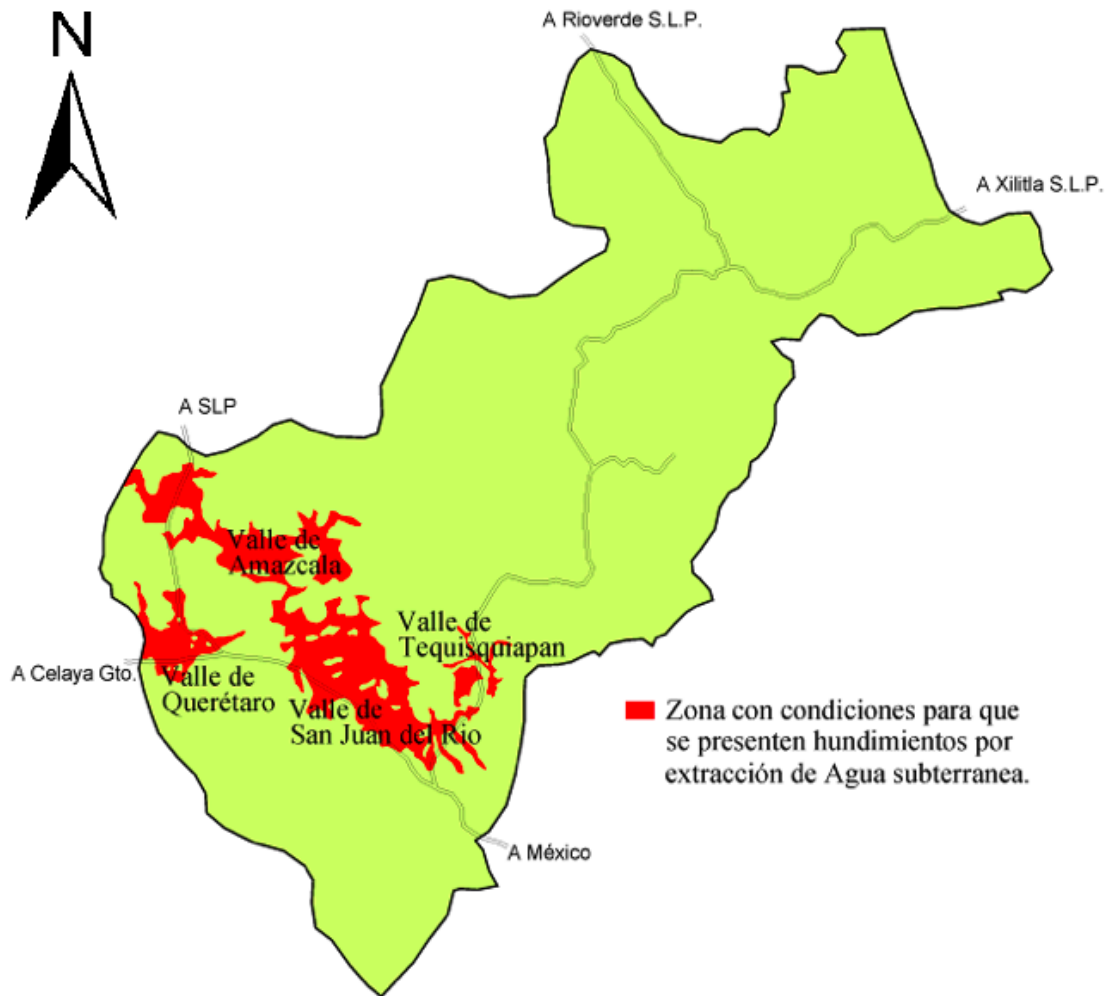


Figura 1.2 Mapa del estado de Querétaro donde se muestran en tono rojo las zonas susceptibles de que se presente subsidencia y agrietamientos por extracción de agua del subsuelo (Pacheco, 2007).

En Querétaro este fenómeno de agrietamiento y fracturamiento a causa de la subsidencia se debe a que no se dispone de otras forma de abastecimiento de agua para el uso domestico, agrícola, ganadero, industrial y comercial, únicamente de extracción de agua subterránea, por medio de pozos, lo que ha desencadenado serios daños a través del tiempo. A este fenómeno se le suma la geología del Valle de Querétaro, que según estudios de laboratorio y geofísicos se ha detectado el espesor de los depósitos aluviales considerando a los mismos como los estratos más susceptibles a deformación (Pacheco, 2007).

1.5 JUSTIFICACIÓN.

El fenómeno de Subsistencia nos lleva a un análisis sobre el efecto de la escala en la que se desarrollan los hundimientos. Auvinety Bouvard (1983) demostraron que algunas propiedades físicas de los suelos, tales como relación de vacíos, porosidad, peso volumétrico, y porcentajes granulométricos, varían dentro de un rango de acuerdo al tamaño de la muestra usada para su determinación, concluyen que la dispersión para suelos gruesos es mayor.

Sus conclusiones sugieren que la consideración de homogeneidad en una masa de suelo depende de la escala en que se examine. Para el Valle de Querétaro el área afectada por la subsidencia se estima en alrededor de $100km^2$, solo en la zona urbana, luego entonces el problema debe abordarse desde una perspectiva macroscópica (Chávez, 2008). Para esta escala, las unidades geológicas que forman el cuerpo del acuífero pueden considerarse homogéneas, y las propiedades geomecánicas de una unidad geológica pueden tomarse como las propiedades promedio de los materiales que la conforman.

Es necesario conocer la diferencia entre que es un acuitardo y un acuífero, sus definiciones son:

Acuífero. Desde el punto de vista hidrogeológico, las formaciones geológicas se clasifican atendiendo a su capacidad de almacenar y transmitir agua. La capacidad de almacenamiento está relacionada con el volumen de huecos existentes, mientras que la capacidad de transmisión se relaciona con el tamaño de los huecos y el grado de interconexión entre ellos. Tanto la capacidad de almacenamiento, como la de transmisión de agua dependen de la porosidad.

Acuitardo. Es una formación geológica semipermeable, que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos.

Además, en algunos trabajos que describen la estratigrafía del valle de

Querétaro (Trejo-Moedano, 1989; CNA, 2000; Carreón-Freyre et al. 2005) se reconoce una capa arcillosa superficial extendida a lo largo y ancho del valle con espesores variables de hasta 10 metros en la parte central, sin embargo la litología de pozos analizada muestran que no existe una unidad arcillosa a profundidad concentrada en alguna zona del valle en particular, por lo que para la escala que se desarrolla el fenómeno, los acuitardos que están embebidos en el acuífero permeable pueden ser considerados homogéneamente distribuidos, o como parece ser el caso más común, están ausentes. Es por tal motivo que se considera más importante el estudio de los asentamientos instantáneos, ya que la estratigrafía muestra en general estratos rocosos en toda su profundidad, sin embargo se da por entendido que para hacer un análisis de asentamientos totales en la zona de falla se deberán extraer muestras de cada uno de los materiales presentes y realizar un ensaye de consolidación. Sin embargo, para los fines del presente trabajo sólo se realizará el primer análisis.

La consideración de homogeneidad debida a la escala, junto con la discusión de la contribución de un acuitardo en el hundimiento neto, implica que puede haber acuíferos en los cuales la cantidad de acuitardos o el tamaño de éstos sean lo suficientemente grandes tal que los hundimientos son controlados por la deformación de los acuitardos. Éste parece ser el caso del acuífero del valle de la ciudad de México (Figueroa-Vega, 1984; Ortega-Guerrero et al. 1993, 1999; Aguilar-Pérez et al. 2006), o el valle de San Joaquín en California EE.UU. (Poland, 1994). En estos casos la teoría tradicional de esfuerzos efectivos explica bien el fenómeno.

Por otro lado, en el proceso de subsidencia del Valle de Querétaro los hundimientos se producen de manera gradual. En la literatura se ha atribuido este comportamiento a la despresurización por efecto de la expulsión del agua de los acuitardos, sin embargo este no es caso del valle de Querétaro en donde la información de la estratigrafía a partir de pozos indica que no existe una unidad arcillosa suficientemente grande y extendida a profundidad como para atribuirle la deformación del acuífero. En el caso del Valle de Querétaro los hundimientos graduales parecen estar ligados a la rapidez con que se abate el nivel piezométrico, donde el incremento de esfuerzos se

produce en forma instantánea por una pérdida de la sustentación hidráulica, se asume que dada la relativa alta permeabilidad del medio que se está deformando, la velocidad del abatimiento del acuífero es proporcional a la velocidad del incremento de esfuerzos y por tanto a los hundimientos superficiales, sin embargo; esta hipótesis tiene que ser probada. En el presente trabajo se tratarán de evaluar los asentamientos elásticos considerando los parámetros obtenidos recientemente por Pacheco (2007) y se compararán con los asentamientos relativos medidos en campo, para emitir una conclusión al respecto de la importancia de la influencia del fenómeno viscoso en el proceso.

Para efectos de esta investigación se considera que los acuitardos se encuentran ausentes, y solamente los acuíferos libres se toman en cuenta, ya que para la metodología utilizada solamente se tiene en consideración la variación del nivel de aguas estático entre los años 1970 y 2011 tomando en cuenta la red piezométrica de abatimiento del Valle de Querétaro 2011.

1.6 DESCRIPCIÓN DE LA TEMÁTICA DE TESIS.

Este trabajo de tesis consta de los siguientes capítulos a abordar:

Capítulo 1. Introducción. Aquí se presentan los objetivos principales y secundarios de la investigación, así como la hipótesis utilizada, la descripción del problema y su justificación.

Capítulo 2. Antecedentes. Este capítulo se encamina a la revisión y análisis de Investigaciones que se tienen acerca del tema, así como los mapas estratigráficos de la ciudad de Querétaro, en los pozos que abarca este trabajo de tesis.

Capítulo 3. Marco Teórico. Este es el capítulo donde se hacen las correcciones del Método de Sustentación Hidráulica de Pacheco (2007) y se analiza el método de Esfuerzos Efectivos Terzaghi (1956).

Capítulo 4. Materiales y Métodos. En este capítulo se muestran los materiales utilizados en esta investigación y se describe como se tomaron las lecturas en sitio del diferencial vertical, y se muestra como se obtienen los

asentamientos por los Métodos de Esfuerzos Efectivos y Sustentación Hidráulica, así como interpolaciones GIS del nivel de abatimiento del agua entre los años 1970 y 2011, así como una predicción del escalón de falla con base a las mediciones tomadas en sitio en un tiempo determinado.

Capítulo 5. Resultados. Aquí se muestran los resultados de los 2 métodos utilizados en este trabajo a fin de hacer una comparación con las mediciones que se realizaron en sitio, y el mapa de predicción de fallas futuras en el Valle de Querétaro al año 2050 y el lecho rocoso en isocurvas..

Capítulo 6. Conclusiones. En este capítulo se hacen observaciones entre los resultados obtenidos, utilizando las dos teorías, y se muestran los problemas de algunos puntos de falla en específico.

Capítulo 7. Anexos. Se muestra material fotografico de las fallas analizadas, además algunos daños a edificaciones debidos a la subsidencia en el Valle de Querétaro.

CAPITULO 2. ANTECEDENTES.

2.1 INTRODUCCIÓN.

Existen muchos trabajos que soportan que el exceso de extracción de agua provoca un cambio en los esfuerzos efectivos y por tanto un incremento en el “peso volumétrico aparente” del material, lo que induce una “compactación” del material que aunado a un lecho rocoso más rígido y con irregularidades provoca asentamientos diferenciales y por tanto fisuras o grietas en la superficie del suelo (Pacheco, 2007).

Para efectos de este trabajo se tomó en cuenta un área en donde debido a la subsidencia se detectó una falla en particular, la cual se ubica entre la colonia Jardines de la Hacienda y la calle Epigmenio González en la ciudad de Santiago de Querétaro, Qro., lugar donde se observa de manera apreciable un asentamiento diferencial vertical debido al fenómeno de subsidencia (escalón de falla), dichos asentamientos diferenciales relativos a ambos lados del escalón se encuentran entre 0.30 y 1.20 m, y es en este lugar donde se observan los mayores daños estructurales, principalmente en casas habitación, vialidades y drenajes. La presente investigación se enfocó al estudio de asentamientos relativos a largo plazo, con base en mediciones en el sitio realizadas por diferentes investigadores y continuada en el presente trabajo, a fin de compararla con asentamientos calculados con el Método de Asentamientos por Esfuerzos Efectivos presentada por Terzaghi (1956) modelada únicamente a través de la consideración de asentamientos elásticos, el cual toma en cuenta el nivel subterráneo del agua; así como el modelo de sustentación hidráulica corregido de Pacheco (2007), que toma en cuenta el incremento en el peso volumétrico aparente del material, ésta última aplicada a suelos no saturados y considerando también únicamente los asentamientos elásticos.

El fenómeno de fallamiento y agrietamiento de los suelos causante de daños a construcciones, edificios y pavimentos, es cada vez más conocido en México, ya que existen muchos valles que vienen padeciendo esta problemática, como los casos de los valles en los que se localizan ciudades como Celaya, Morelia, Irapuato, San Luís Potosí, Querétaro, y

Aguascalientes, etc., en donde los fallamientos y agrietamientos, son cada vez mas frecuentes. (Chávez, 2008).

Las áreas urbanas de estas ciudades han crecido y se han extendido alrededor de los núcleos poblacionales, ocupando zonas que en un principio tuvieron un uso agrícola. Además como consecuencia del crecimiento se generó un aumento en la demanda del abastecimiento del agua para satisfacer las necesidades básicas tanto de la población y de la industria, así como del riego de los campos de cultivo para abastecer el consumo. Al conocer de fuentes de agua superficiales naturales (lagunas, lagos, manantiales etc.) y al rebasar la capacidad de aprovisionamiento de los artificiales (represas, presas, bordos etc.), ha sido la explotación de los cuerpos de agua que se encuentran en el subsuelo, mediante la perforación de pozos, la que ha cubierto la creciente demanda.

Las zonas con mayor potencial para la explotación del agua del subsuelo, y por tal razón las de presentan un mayor desarrollo y crecimiento, son los valles formados en cuencas que en un proceso de millones de años han sido cubiertas por materiales granulares, usualmente de origen aluvial y lacustre, los cuales son un excelente medio para la formación de depósitos de agua susceptibles de ser aprovechados.

Cuando la cantidad de agua que se extrae del subsuelo es más grande que la cantidad de agua que entra al acuífero por infiltración, se dice que el acuífero está siendo sobreexplotado. La sobreexplotación del acuífero de una cuenca que contiene suelos granulares, aluviales o lacustres con cierto potencial de ser consolidados, tiene como consecuencia la generación de hundimientos, asentamientos y acomodamientos graduales del suelo. Debido a que la magnitud de los hundimientos es de unos cuantos centímetros por año son casi imperceptibles, pero después de algunos años los hundimientos generan problemas tales como cambios en el drenaje natural del área que se hunde y consecuentes inundaciones en la temporada de lluvia, etc. (Pacheco, 2007).

Además de los hundimientos, se presentala aparición de fracturamientos y fallamientos superficiales del suelo, los cuales afectan todo

tipo de infraestructura, edificios públicos y privados, pavimento de calles, banquetas, tuberías de agua potable, drenaje, gas, etc.

El término subsidencia describe este fenómeno y fue empleado primero en minería. La Real Academia de la lengua Española define como subsidencia al “Hundimiento paulatino del suelo, originado por las cavidades subterráneas producidas por las extracciones mineras”.

Para fines técnicos y particularmente para los fines de este trabajo, una definición más precisa de subsidencia será, “El fenómeno que tiene lugar debido a la extracción de sólidos (minerales) o fluidos (gas, petróleo, vapor, agua, etc.) del subsuelo, que se manifiesta en hundimientos paulatinos o súbitos de la superficie y en la generación de agrietamientos en la masa del suelo”.

En este trabajo se abordará el estudio de la subsidencia y la generación de agrietamientos originados por la extracción del agua subterránea y en particular, la ocurrencia de estos en el Valle de Querétaro. Para ello se analizarán las medidas tomadas desde el año 1998 de asentamiento por este fenómeno (Arroyo et al. 1999 y 2002). Concretamente en este trabajo se aborda el problema de los hundimientos desde el punto de vista de la predicción de asentamientos relativos y el periodo de estabilidad de los mismos.

Por otro lado, la orientación de la traza de los agrietamientos corresponde con la orientación de las principales fallas geológicas que formaron el graben de Querétaro, lo cual sugiere que su ocurrencia está ligada a la presencia de estructuras geológicas sepultadas. Ésto refuerza la hipótesis de que la generación de agrietamientos es debida a los hundimientos diferenciales (Trejo, 1991).

La hipótesis de que el origen de los fallamientos de suelo es por tectonismo es descartada, por el hecho de que en los afloramientos rocosos que rodean al valle fuera de la zona de rellenos aluviales no se han reportado agrietamientos o fracturamientos recientes. La ocurrencia de éstos se limita a las zonas donde existen rellenos granulares que forman parte del acuífero

drenado.

Además, no se ha reportado actividad sísmica contemporánea al crecimiento de los agrietamientos dentro del Valle de Querétaro. Sin embargo el monitoreo sísmico del valle es muy reciente por lo que no se descarta una componente del tectonismo en épocas más antiguas en la formación de algún fallamiento que en la actualidad haya sido activado por efecto del drenado del acuífero. En todo caso, el estudio de la probable generación de agrietamientos en el acuífero por tectonismo está fuera de los objetivos de este trabajo de investigación (Aguirre-Díaz et al. 2000 y 2005; Zúñiga-et al. 2003).

También existe la hipótesis de que los agrietamientos se asocian a los conos de abatimiento, en donde el gradiente del nivel piezométrico es mayor, ciertamente existe una relación directa entre el descenso del nivel piezométrico y los hundimientos superficiales, que ha sido documentada en otras zonas de subsidencia y agrietamientos (Zermeño et al. 2006), pero esta hipótesis implica que los agrietamientos se generarían siguiendo las formas concéntricas de los niveles piezométricos alrededor de las zonas de mayor abatimiento, y además se tornarían itinerantes siguiendo el gradiente de la piezometría conforme esta cambiara, y este comportamiento no se ha observado en los agrietamientos del Valle de Querétaro. Se propone como explicación a la observación en campo de la no asociación de agrietamientos al gradiente de la piezometría en el Valle de Querétaro, el que éste no sea suficiente grande como para generar hundimientos diferenciales y puedan generar además agrietamientos superficiales.

Morfológicamente se han diferenciado dos tipos de agrietamientos (Jachen y Holtzer, 1982). Uno que se desarrolla en escarpes al presentarse desplazamiento vertical relativo entre los dos bloques generados por el plano de ruptura, y el cual es atribuido a un lecho rocoso en forma de escalón (Figura 2.1.1). Y otro que no desarrolla escarpe en superficie, simplemente se presenta como un fracturamiento de suelo. Este tipo de agrietamiento se asocia a protuberancias en el lecho rocoso. (Figura 2.1.2)

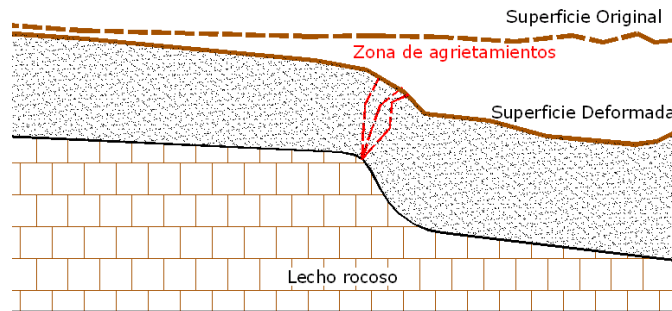


Figura 2.1.1 Lecho rocoso en forma de escalón asociado a callamientos superficiales (Jachen y Holtzer 1982).

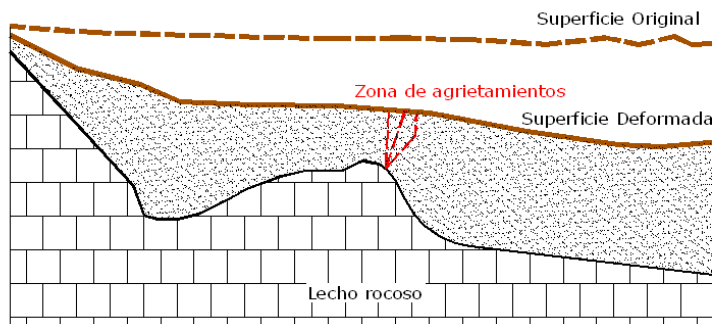


Figura 2.1.2 Lecho rocoso en forma de protuberancia basal asociado a fracturamientos superficiales (Jachen y Holtzer 1982).

2.2 MODELO DE ESFUERZOS EFECTIVOS (Terzaghi, 1956).

Un trabajo muy importante en la literatura del cual se desprenden varios modelos que explican el proceso de subsidencia, es el de la teoría de la Consolidación de Terzaghi (1956), en la cual se retomó el concepto de Esfuerzos Efectivos formulado por Boussinesq (1876), y que constituye la referencia de partida para trabajos de cálculo de hundimientos. De acuerdo con la ecuación de esfuerzos efectivos, el esfuerzo que soporta el esqueleto del suelo, es decir el esfuerzo efectivo (σ_u) es igual al esfuerzo total en la masa de suelo (σ^T) menos la presión de poro (u), esto es:

$$\sigma_u = \sigma^T - u \quad (2.2.1)$$

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

$$\sigma^T = \gamma_m z \quad (2.2.2)$$

En el caso de que los sedimentos se encuentren bajo el nivel de agua de un acuífero libre, es decir, el agua se encuentra en condición hidrostática, la presión total por peso propio para una profundidad z bajo el nivel de agua está dado por:

$$\sigma^T = \gamma'_m z \quad (2.2.3)$$

Donde γ_m y γ'_m son el peso volumétrico de la masa de rellenos sedimentarios en condición parcialmente saturada y sumergida respectivamente.

La consolidación que tiene lugar en una columna de suelo de espesor H ante un incremento de carga Δp actuante sobre la columna está dada por la ecuación 2.2.5.

$$\Delta H = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} H \quad (2.2.5)$$

Donde e_1 y e_2 son la relación de vacíos antes y después de aplicar Δp respectivamente, ΔH es el acortamiento de la columna. La teoría de consolidación unidimensional ha sido adaptada para su aplicación en problemas de hundimientos por extracción de agua (Helm, 1975, 1976 ; Trescott, 1975; Meyer y Carr, 1979; Rivera y Ledoux, 1991; Mishra et al, 1993; Shimizu, 1998).

2.3 MODELADO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE LOS HUNDIMIENTOS.

Sheng y Helm (1995) presentaron varios modelos conceptuales de escenarios donde se pueden originar agrietamientos cuando ocurre un abatimiento del nivel piezométrico. A continuación se describen cada uno de ellos.

Modelo 1.

Este modelo considera que las interfaces de los diferentes estratos que conforman el cuerpo del acuífero actúan como planos de debilidad (Figura 2.3.1a). También proponen que se generan fuerzas hidráulicas por el flujo del agua hacia el pozo que drena al acuífero, que inducen esfuerzos de cortante en los planos de debilidad y provocan un deslizamiento sobre el plano de contacto entre estratos (Figura 2.3.1b). A cierta distancia del punto de bombeo el deslizamiento entre los estratos ya no continúa, 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.

Modelo 2.

Se considera que el cuerpo del acuífero es discontinuo debido a la presencia de una falla preexistente de origen no especificado (Figura 2.3.2). Las fuerzas hidráulicas generadas por el bombeo de agua pueden ocasionar desplazamientos entre los dos bloques definidos por la falla, tales desplazamientos pueden hacer que la falla se abra en superficie y genere fracturamientos secundarios similares a fallas normales o inversas.

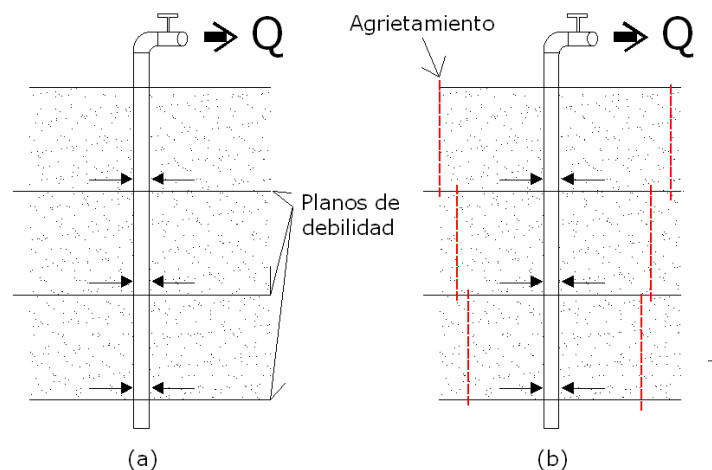


Figura 2.3.1 Modelo 1. El fracturamiento es el resultado de la transmisión de esfuerzos de cortante en las interfaces de los estratos hacia la superficie (Sheng y Helm 1995)

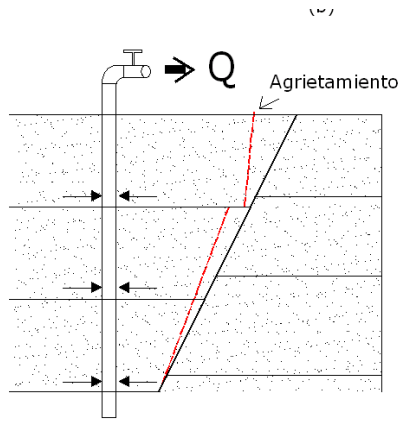


Figura 2.3.2 Modelo 2. Los fracturamientos son controlados por una falla preexistente (Sheng y Helm(1995)

Modelo 3.

Considera un acuífero con cambios abruptos en el espesor del relleno granular o con heterogeneidades (Figura 2.3.3) debido a esto se provoca rotación del material, esfuerzos cortantes y deformación de extensión a diferentes profundidades, provocando la falla de la masa de suelo que se manifiesta en superficie como un fallamiento.

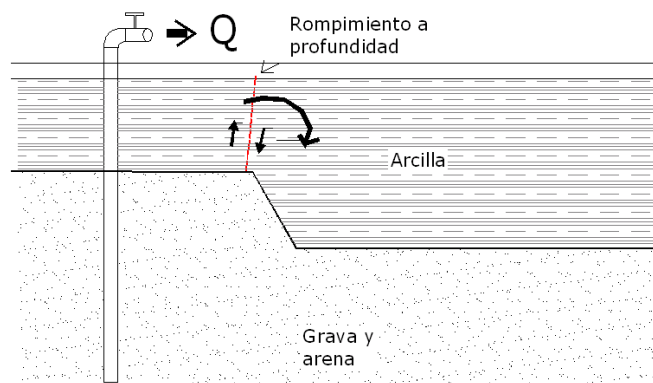


Figura 2.3.3 Modelo 3. Se generan rompimientos a profundidad debida a heterogeneidades o cambios súbitos en el espesor del acuífero (Sheng y Helm 1995)

Por otra parte a partir del modelo de generación de fallamientos y fracturamientos por hundimientos diferenciales, (Carpenter, 1999) presentó una explicación al hecho de que los agrietamientos se generan casi de forma instantánea después de una lluvia torrencial (Figura 2.3.4). Carpenter considera que los agrietamientos generan una zona de debilidad en la superficie y que cuando se presenta una lluvia torrencial, el agua se infiltra a través de la zona de grietas erosionándola y haciendo que su tamaño

aumente en cuestión de minutos.

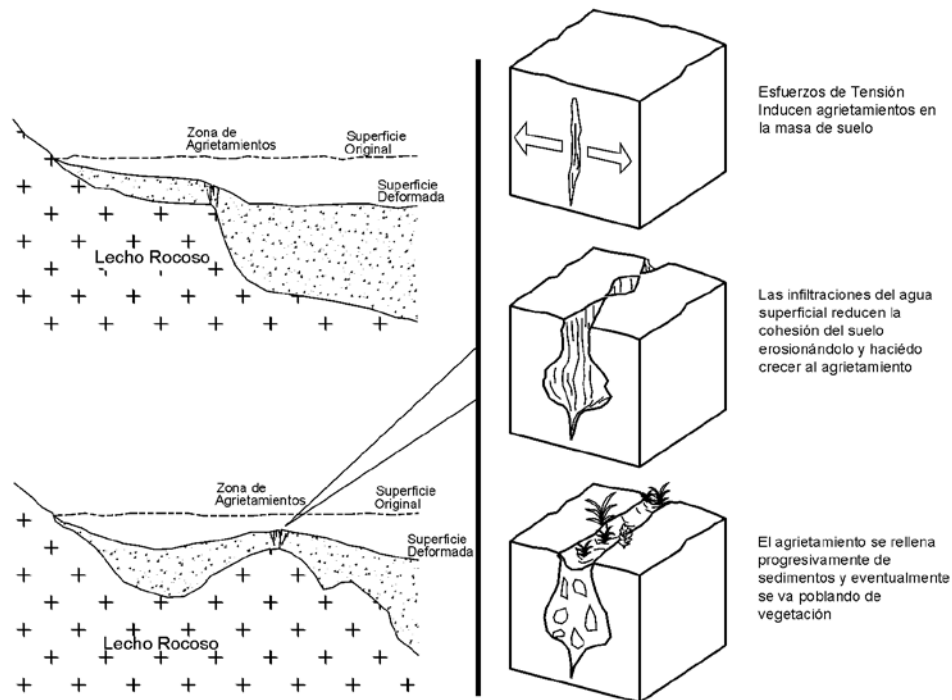


Figura 2.3.4 Esquema que explica la generación rápida de fallamientos y fracturamientos después de una lluvia abundante. Adaptado de Carpenter (1999).

Posteriormente, Burbey (2002) describió otro escenario en donde se pueden originar fallamientos. Hizo un análisis numérico con un escenario que consiste en un acuífero con fallas preexistentes en los materiales granulares. En la simulación que hizo, las fallas funcionaron como discontinuidades al flujo horizontal, provocando un abatimiento no uniforme del nivel del agua subterránea, y por consiguiente, generando hundimientos diferenciales y en consecuencia la formación de un fallamiento en la superficie (Figura 2.3.5).

Un problema de especial importancia, no resuelto en el estudio de los agrietamientos superficiales, es el de determinar el ancho de influencia de las grietas, el cual puede definirse como la distancia a ambos lados de ésta, en donde las deformaciones son tales que pueden afectar la estabilidad de las construcciones e infraestructura.

Sobre este concepto Raisbeck y Pedler (1985) presentaron un modelo esquemático que muestra el ancho de influencia. Muestra también que los hundimientos diferenciales se propagan a partir de un punto en el subsuelo hacia la superficie con un ángulo de 70° (Figura 2.3.6). Los autores no

explican los criterios para determinar desde que profundidad se propagan a la superficie ni tampoco por qué se propaga con un ángulo de 70°.

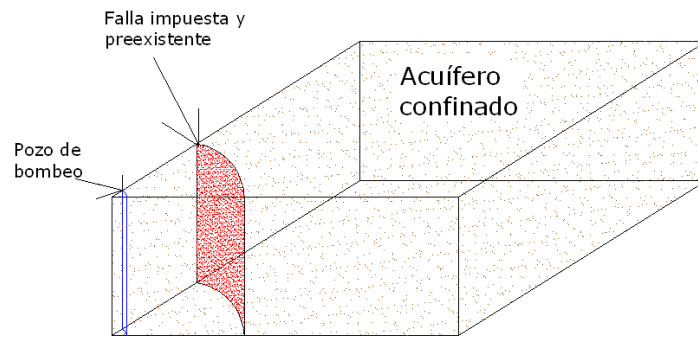


Figura 2.3.5 Escenario en el cual se pueden generar agrietamientos (Burbey, 2002)

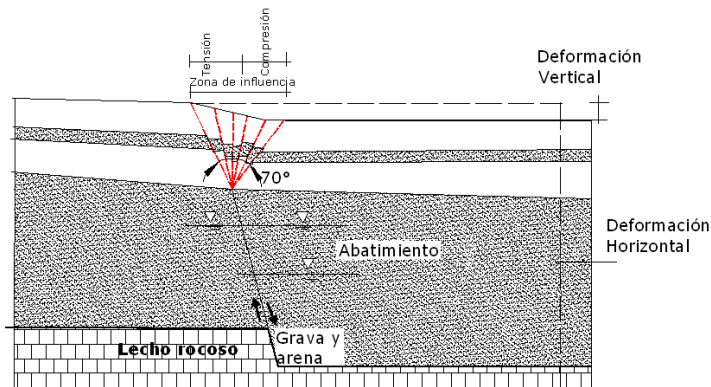


Figura 2.3.6 Ancho de influencia de un fallamiento. Adaptado (Raisbeck y Pedler, 1985).

En Querétaro, el mecanismo de formación de agrietamientos ha sido estudiado por Trejo-Moedano y Martínez-Baini (1991), quienes propusieron dos mecanismos probables para explicar los agrietamientos del valle. Uno que supone que el fenómeno se genera por una combinación de la deshidratación de la capa superficial y la consolidación no uniforme por efecto de las construcciones y de la extracción de agua subterránea de un acuífero heterogéneo.

El otro mecanismo propuesto es por consolidación diferencial en un acuífero formado por rellenos aluviales depositados sobre un cauce, canal sepultado o fosa tectónica. La hipótesis principal para 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. Resalta en esta propuesta la hipótesis de que se forman dos estratos con comportamiento diferente, uno que incluye al material que una vez que ha

sido drenado su deformación se considera nula, y el otro compuesto por el material bajo el nivel de agua que sigue consolidándose. 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 en la que yace la masa de suelo aluvial que se está drenando que se manifiestan en agrietamientos paralelos al eje de la depresión (Figura 2.3.7). Los autores destacan que la formación de grietas se acelera en donde existe una zona de abatimiento del nivel de aguas o en los contactos entre materiales con diferente comportamiento.

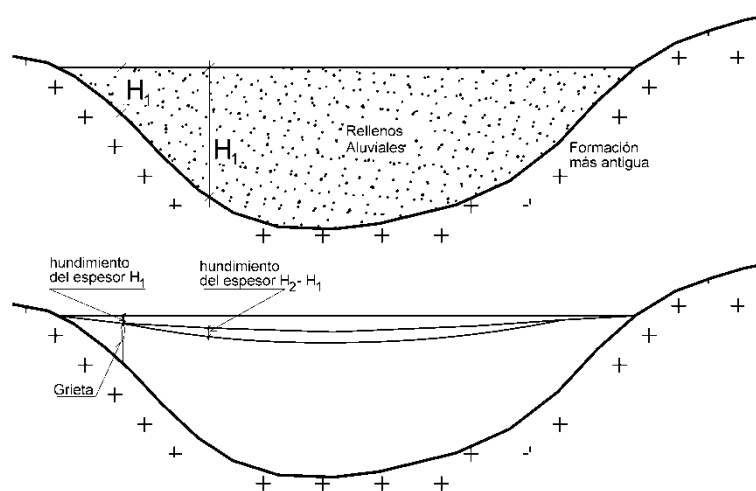


Figura 2.3.7 Mecanismo de formación de agrietamientos propuesto para las condiciones del valle de Querétaro. Adaptado de Trejo-Moedano y Martínez-Baini (1991)

Existe otro modelo de generación de agrietamientos para el valle de Querétaro. Este trabajo aunque reconoce la influencia de la forma del lecho rocoso en la generación de grietas, concluyó que la variación en la profundidad del nivel piezométrico, dada por la configuración de los conos de abatimiento, es suficiente para producir hundimientos diferenciales e inducir fallamientos en la superficie (Figura 2.3.8) (Álvarez-Manilla, 1999).

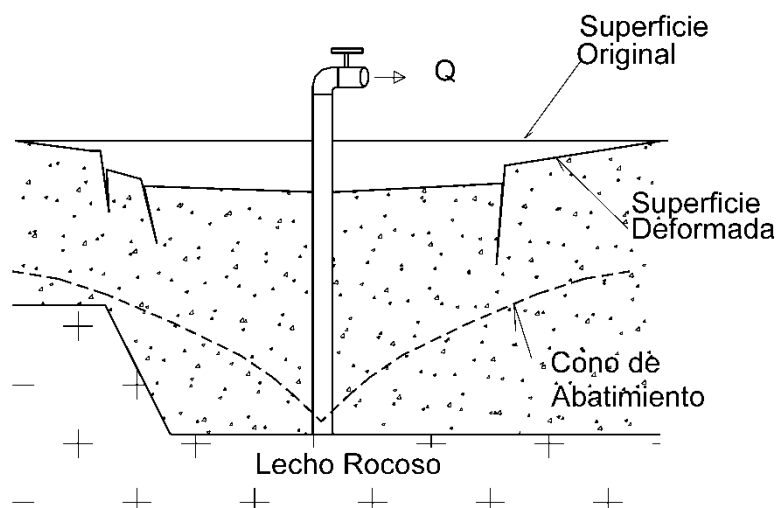


Figura 2.3.8. Mecanismo de Generación de fallamientos adaptado de Álvarez-Manilla (1999).

2.4 GEOLOGÍA DEL VALLE DE QUERÉTARO.

El Valle de Querétaro se localiza dentro del graben complejo del mismo nombre formado por la intersección de los sistemas de fallas regionales Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) y el sistema Chapala-Tula (Aguirre-Díaz et al., 2000 y 2005). Los límites Oriente y Poniente del graben de Querétaro están bien definidos (Figura 2.4.1): al poniente la falla San Bartolomé (No. 58, N10°W) al oriente la falla Querétaro Norte (No. 67, N5°W), Querétaro Sur (No. 68, N25°W) y Huimilpan Norte (No. 69, N26°W). Los límites norte y sur del graben no están claramente definidos, al norte el volcán la Joya es considerado el fin del sistema de falla Taxco-San Miguel de Allende (Valdez-Moreno et al., 1998), por lo que puede ser considerado el límite norte del graben de Querétaro. Al sur se presentan una serie de fallas normales con rumbo (ENE-WSW) con echados generalmente hacia el norte, por ejemplo las fallas No. 42,43 y 44. El nombre y número de las fallas se presenta en la Tabla 2.4.1.

Dentro del Graben de Querétaro se encuentra una depresión, fosa o graben secundario, se le conoce como fosa Querétaro. Esta fosa es definida en su hombro poniente por las falla Tlacote (No. 61, N19°W), y en la parte oriente por la falla 5 de Febrero (No. 65-66, N12°W); al norte lo limita la Falla Jurica (No. 5, N85°W) y al sur la Falla Lourdes (No. 44, N65°W). La fosa está rellena con sedimentos granulares de origen aluvial y lacustre no

consolidados con intercalaciones de derrames de lava de espesores variables. Sobre la fosa se ubica la parte poniente del valle de Querétaro y es uno de los sitios en donde se ha registrado el fenómeno de subsidencia y la generación de agrietamientos.

Todas las fallas se presentan en la superficie como altos topográficos, con excepción de la falla 5 de Febrero en la parte central del valle entre las fallas No. 14 y 45, donde está sepultada por los rellenos granulares (Figura 2.4.1). Justo sobre el escarpe de la falla sepultada se ha observado un fallamiento superficial, lo cual apoya la hipótesis de que el mecanismo de generación de los agrietamientos es por hundimientos diferenciales causados por la variación del espesor de sedimentos.

Alaniz-Álvarez et al. (2001), con base en los estratos cortados por las fallas y el grado de erosión de los escarpes, infieren que el periodo durante el cual se registró la mayor actividad de las fallas que forman el graben ocurrió hace 5.3 a 10 millones de años. El sistema de fallas que delimita la fosa Querétaro no ha presentado actividad sísmica en años recientes, sin embargo en la zona de Sanfandila, aproximadamente 20 km al Sur-Este de la ciudad de Querétaro, se registró actividad sísmica en 1998, consistente en una secuencia de eventos sísmicos cuyo evento mayor fue de magnitud $M_w=3.4$. Esta actividad sísmica no ha sido relacionada con la subsidencia si no a la reactivación de fallas corticales, lo cual refuerza la hipótesis de que los hundimientos y agrietamientos son efecto de la pérdida de sustentación hidráulica en el sistema acuífero por causa del abatimiento en el nivel piezométrico(Aguirre-Díaz et al., 2000 y 2005, Zúñiga et al., 2003).

Numero Falla	Nombre de la Falla	Azmut (grados)	Longitud (km)
1	Ixtla	71	11.2
2	Ojo Zarco	75	4.3
3	La Estaca	77	1.4
4	San Ignacio	67	6.5
5	Jurica	86	7.2
6	El Salitre	86	8.9
7		90	2.3
8	San José el Alto	82	8
9		90	1.5
10		69	3
11		88	4
12		90	7.5
13	Menchaca	79	6
14		77	6
15	Saldarriaga	77	6
16		76	4.5
36		256	2.1
37		253	2.3
40		254	3.1
42		256	6.8
43		252	4.6
44	Lourdes	246	9.2
45		256	3
46		72	3.5
47		249	4.1
48	Cimacuático	77	13
49	Los Cues	76	10.8
50	Boliche	249	1.8
51		258	2.5
52		261	1.6
53		261	2.1
55	San Vicente Ferrer	276	10
56		346	4.8
58	San Bartolomé Norte	352	13
60		6	3.6
61	Tlacote	348	25.6
62	El Batán Norte	339	7.6
64a	El Milagro Oeste	256	22.9
64b	El Milagro Este	165	4.1
65	5 de Febrero Norte	171	16.4
66	5 de Febrero Sur	162	9.8
67	Querétaro Norte	171	12.1
68	Querétaro Sur	156	10
69	Huimilpan Norte	155	14
72		270	1.7
74		270	3.9

Tabla 2.4.1 Azimut y longitud de las fallas que se muestran en la figura 2.11. Tomado de Aguirre-Díaz et al. (2005)

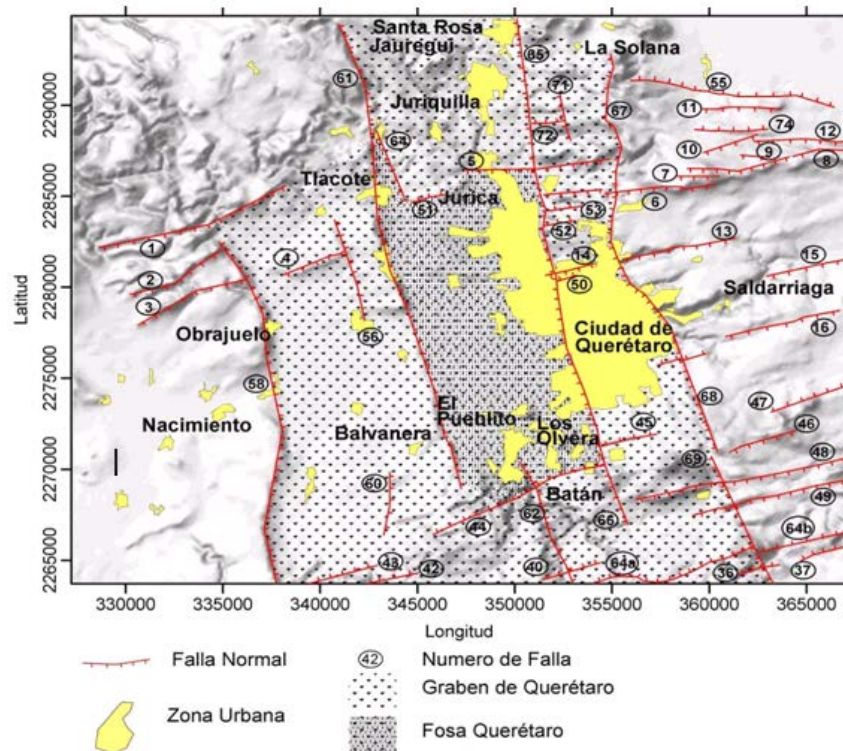


Figura 2.4.1 Fallas que delimitan y dan forma al graben de Querétaro. La zona achurada corresponde a lo que se conoce como el valle de Querétaro, el cual se ubica sobre la parte más profunda del graben conocida como fosa de Querétaro. Adaptado de Aguirre-Díaz et al., 2005.

Son de interés las propiedades geomecánicas de las diferentes unidades geológicas (densidad y relación esfuerzo deformación principalmente). Las edades de las diferentes unidades, lo mismo que las características mineralógicas de las diferentes rocas no son esenciales para los fines de la modelación de los datos gravimétricos y la simulación numérica de la subsidencia, lo que permite hacer una simplificación de la geología y de la columna estratigráfica de la zona de estudio, tomando como referencia propiedades tales como densidades promedio similares y rangos de comportamiento esfuerzo-deformación parecidos (Pacheco, 2007).

La Figura 2.4.2 muestra la columna estratigráfica reportada por Carreón-Freyre et al. (2005) y la columna simplificada para los fines de la modelación de datos gravimétricos y de la simulación numérica. La secuencia estratigráfica en el Valle de Querétaro fue descrita por CNA (2000) Alaniz-Álvarez et al. (2001), Arroyo et al. (2002) y Carreón-Freyre et al. (2005).

La unidad más antigua está formada por lutitas y areniscas del Mesozoico sobre las cuales yace una unidad de rocas calizas del Cretácico inferior (Ki Cz Ar). La edad de esta unidad es de 100 a 110 millones de años (Chiodi et al. 1988). Esta unidad se considera el basamento pre-volcánico del Valle de Querétaro debido a que no se conoce qué espesor tiene y qué tipo de roca hay bajo de ella. La caliza aflora en el norte del valle (Figura 2.4.3), y aunque los pozos perforados en el valle no la cortan, a través de sondeos Magnetotelúricos (MT) se ha inferido esta unidad de caliza a una profundidad aproximada de dos km en el centro del mismo.

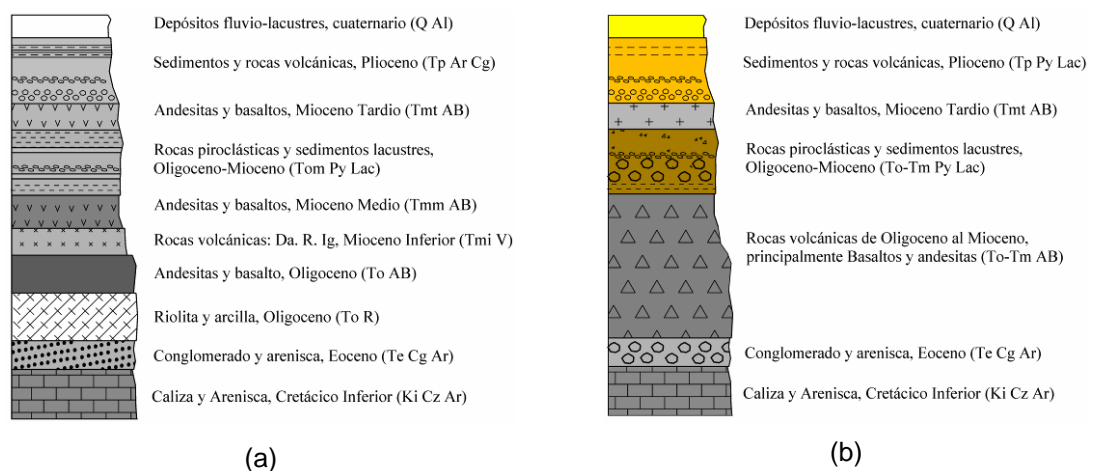


Figura 2.4.2 (a) Columna estratigráfica reportada para el valle de Querétaro por Carreón-Freyre et al. (2005). (b) simplificación de la columna geológica para fines del modelado de datos gravimétricos y de simulación de la subsidencia del valle. La nomenclatura de la columna simplificada se explica en el texto.

Es posible hacer una simplificación de la columna estratigráfica reportada por Carreón-Freyre et al. (2005) agrupando la litología en seis unidades que yacen sobre el basamento calcáreo. La primera unidad es un paquete de sedimentos continentales del Eoceno (Te Cg Ar), que yacen sobre el basamento Mesozoico y está formado por areniscas y conglomerados intercalados con derrames de basalto e ignimbrita. La segunda unidad corresponde a una secuencia de rocas volcánicas del Oligoceno al Mioceno, principalmente derrames de andesita y basalto (To-Tm AB) con intercalaciones de toba y presencia de ignimbrita hacia la base de la unidad. Sobre este paquete se encuentra la tercera unidad litoestratigráfica conformada por una secuencia de sedimentos lacustres y piroclastos del Oligoceno y del Mioceno (To-Tm Py Lac) medianamente consolidados; en

esta unidad se presentan principalmente horizontes de conglomerado y arenisca con intercalaciones de toba de caída y material piroclástico (Alaniz-Álvarez et al., 2001). Estos sedimentos están alternados con derrames de basalto. El espesor de esta unidad puede alcanzar los 450 metros en el centro del valle (CNA, 2000). La cuarta unidad está constituida por derrames de lava de composición basáltica y andesítica (Tmt AB). A esta unidad se le conoce como “Basalto Querétaro” y ha sido encontrada en casi todo el Valle de Querétaro en afloramientos en los límites del valle o en estratos de diversos espesores en las perforaciones de pozos. El Basalto Querétaro yace sobre los depósitos del Oligoceno-Mioceno y su espesor observado en el valle por medio de los registros de pozos varía desde unos pocos metros hasta 210 metros. El espesor mayor observado para esta unidad es de 400 metros en un pozo perforado en el Valle de Obrajuelo.

Carreón-Freyre et al. (2005) identificaron este estrato como la secuencia volcánica que divide las dos principales secuencias fluvio-lacustres terciarias del Valle de Querétaro. El basalto se intercala con capas de material lacustre, aluvial y piroclásticos. Esta unidad geológica es considerada el basamento hidrológico del acuífero somero, y para este trabajo se considera el límite de la masa de material que se está deformando.

El acuífero superficial está formado por la quinta y sexta unidades geológicas que consisten en una secuencia de origen aluvial y lacustre de material granular del Cuaternario (Q Al), integrado por un paquete compuesto por arcilla, limo y arena fina que se presenta en espesores variables de hasta 50 metros en la parte central del valle. Bajo de los rellenos del Cuaternario se encuentra una secuencia de depósitos fluviales, aluviales, lacustres y piroclastos no consolidados (TpPy Lac), compuesta por arcilla, arena, grava, toba y otros piroclastos no consolidados intercalados con conglomerados. Carreón-Freyre et al. (2005) asignan una antigüedad del Plioceno a este paquete de sedimentos.

El cuerpo del acuífero granular superficial está formado por estos dos paquetes de sedimentos (CNA, 2000 y Arroyo et al., 2002) de donde se ha drenado la mayor parte del agua que se ha extraído del acuífero del valle (Álvarez-Manilla, 1999).

La simulación del proceso de subsidencia del Valle de Querétaro se hizo mediante una discretización en prismas rectangulares del volumen de sedimentos deformables. Se calculó la deformación longitudinal de cada columna definida por una sección de 50x50 metros y la altura que le correspondió a cada una con base a su posición. La altura total de la columna se compone por el espesor de las unidades Q Al y TpPy Lac, dichos espesores varían de acuerdo a la posición de la columna dentro del valle. Se analizó únicamente el hundimiento que experimenta el acuífero superficial conformado por las unidades Q Al y TpPy Lac, debido a que la unidad Tmt AB que les subyace a las primeras, es el lecho rocoso que modifica el campo de deformaciones de la masa de suelo que se está drenando.

Los registros de pozos muestran que los espesores del paquete de sedimentos granulares pueden sobrepasar los 120 metros, y de acuerdo con sondeos MT puede alcanzar más 300 metros en la parte central del valle.

La CNA reportó 18 pruebas de bombeo para caracterizar el acuífero, dieciséis de las cuales resultaron representativos de un acuífero libre y dos de un acuífero semiconfinado. Las pruebas de bombeo revelaron también que el basamento hidrológico es un acuífero en medio fracturado. La geología simplificada del valle de Querétaro se muestra en la Figura 2.4.3 (CNA, 2000).

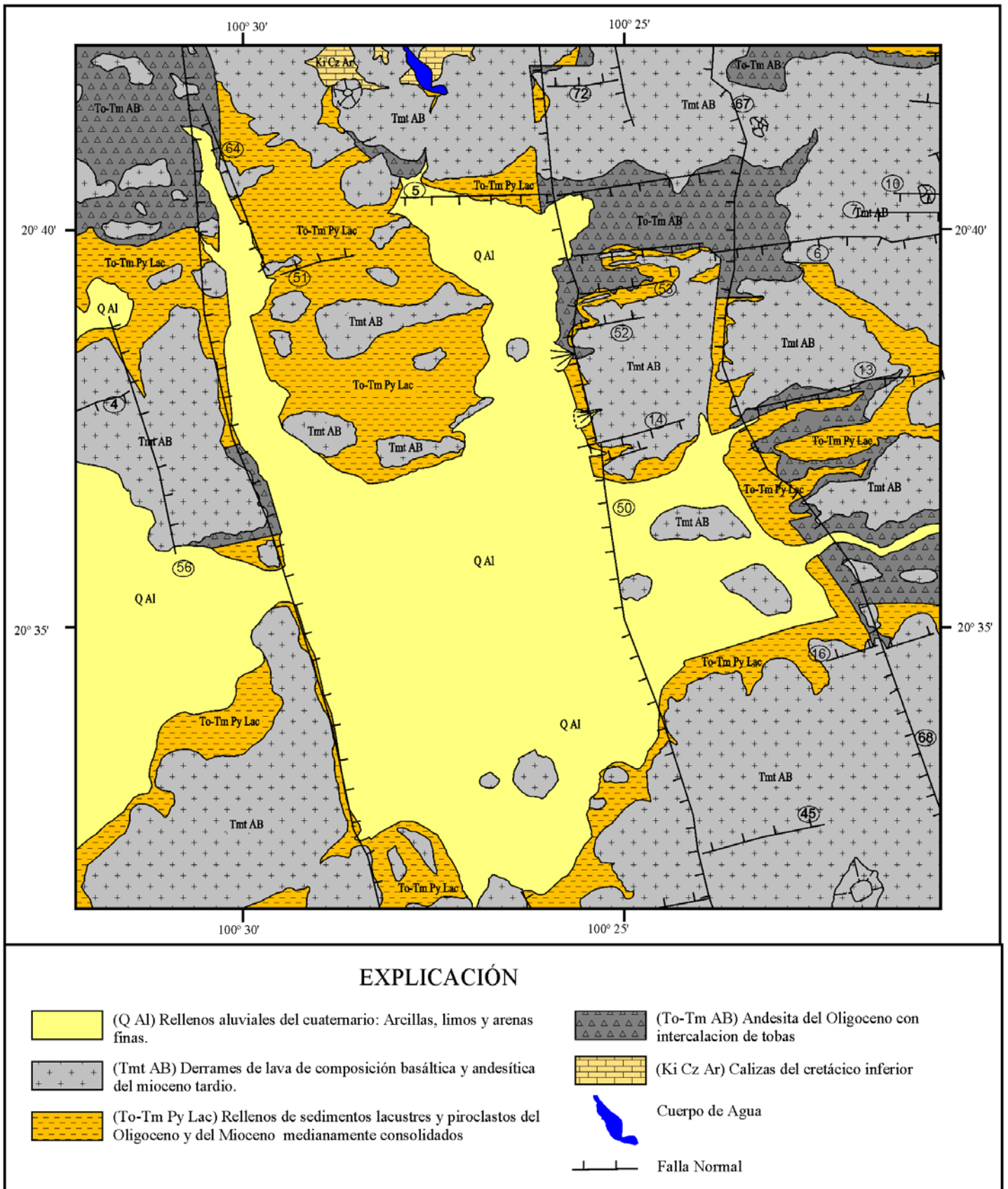


Figura 2 4 3 Carta geológica simplificada del valle de Querétaro. Tomada y adaptada de Arroyo et al., 2002. La nomenclatura de fallas es la usada por Aguirre-Díaz et al. (2005).

Los valores de los parámetros del suelo utilizados en esta investigación son los valores promedios para cada unidad que fueron medidas y/o reportados. Dichos parámetros se resumen en la Tabla 2.4.2

MATERIAL	γ_s (Kg/m ³)	γ_w (Kg/m ³)	ω (%)	γ_1 (Kg/m ³)	γ_2 (Kg/m ³)	$\Delta\gamma$ (Kg/m ³)
Depósitos lacustres y aluviales no consolidados (Q Al)	2471	1000	0.26	1471	3113	1642
Depósitos fluviales, aluviales y lacustres de piroclastos no consolidados (TpPy Lac)	2600	1000	0.37	1600	3562	1962
Andesitas y Basaltos (Tmt AB)	*****	*****	*****	*****	*****	0
Sedimentos lacustres y clastos volcánicos medianamente consolidados (Tm-Tm Py Lac)	*****	*****	*****	*****	*****	0
Andesitas y Basaltos (To-Tm AB)	*****	*****	*****	*****	*****	0

Tabla 2.4.2 Determinación del incremento aparente en el peso volumétrico para los paquetes de sedimentos drenados. Los datos para el cálculo fueron tomados de: Trejo-Moedano (1989); Álvarez-Manilla (1999) y Hunt (1986) (datos para materiales similares).

Se calcularon las deformaciones para diferentes abatimientos del nivel piezométrico, considerando que el nivel inicial tenía la misma forma y posición de la superficie, y que el nivel piezométrico final tiene también la misma forma de la topografía superficial.

La tabla 2.4.3 muestra los incrementos aparentes del peso volumétrico calculados para las unidades de rellenos Q Al y TpPy Lac, a partir de las propiedades del suelo medidas y/o reportadas para estas unidades geológicas del valle de Querétaro. El incremento aparente del peso volumétrico en los demás estratos es igual a cero, puesto que sólo se considera el drenado del acuífero superficial conformado por las dos unidades geológicas antes mencionadas (Pacheco, 2007).

Estos datos son tomados de Trejo-Moedano (1989), BCM Geotecnia S.C. (2005), Álvarez-Manilla (1999), obtenidos en laboratorio.

<i>MATERIAL</i>	V_p (m/s)	V_s (m/s)	ρ (kg/m ²)	μ (Pa)	λ (Pa)	ν	G (kg/cm ²)	E_{DIN} (kg/cm ²)	E_{EST} (kg/cm ²)
Depósitos lacustres y aluviales no consolidados (Q Al)	550	354	1630	240'2655,080	84'544,840	0.15	2083	4776	597
Depósitos fluviales, aluviales y lacustres de piroclastos no consolidados (TpPy Lac)	536	305	1526	142'995,165	155'184,186	0.26	1458	3672	459
Andesitas y Basaltos (Tmt AB)	.....	.....	2600-3000	.....	.....	.....	.....	.....	1000000
Sedimentos lacustres y clastos volcánicos medianamente consolidados (To-Tm Py Lac)	.....	.....	1800	.....	.....	.....	.....	.....	2000
Rocas volcánicas Terciarias (Tm-To AB)	.....	.....	2600-3000	.....	.....	.....	.....	.....	1000000

Tabla 2 4.3 Valores de velocidades de propagación de ondas sísmicas y módulos de elasticidad de los rellenos que conforman el acuífero del valle de Querétaro, medidos en campo; UAQ, 1998; y Hunt, 1986 (datos para materiales similares). V_p : velocidad de la onda P; V_s : velocidad de la onda S; ρ : densidad del material considerado; μ, λ : constantes elásticas de Lamé; ν : coeficiente de Poisson; G : rigidez al cortante; E y E : módulos elásticos dinámico y estático (Pacheco, 2007).

Para este trabajo de tesis se tomaron solo algunos puntos donde la falla es muy significativa, y afecta a muchas personas que allí habitan, se trata de la falla llamada 5 de Febrero, se monitoreó el desplazamiento vertical relativo del bloque bajo con respecto al bloque alto del fallamiento, mediante la medición en diferente tiempo, del desnivel de testigos colocados a un lado y otro del fallamiento. Las nivelaciones de los testigos se realizaron desde febrero de 1998 hasta marzo del 2004 en los sitios mostrados en la Figura 2.4.4. Las nivelaciones hasta julio del 2000 son las reportadas por Arroyo et al. (1999 y 2002), las restantes se hicieron como parte de los datos recabados en el trabajo de Pacheco et al (2007), y retomándolos y actualizándolos hasta el año 2010 con este trabajo de tesis.

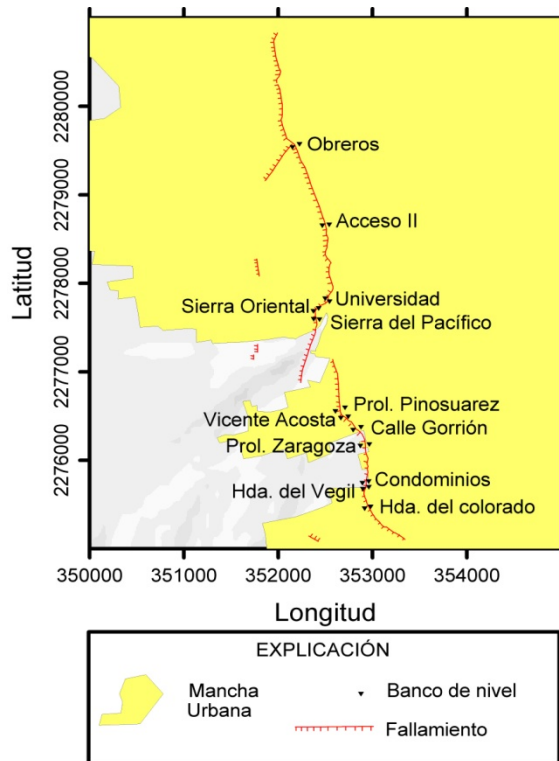


Figura 2.4.4 Ubicación de testigos sobre el fallamiento 5 de Febrero que se usaron para monitorear el desplazamiento vertical relativo en los bordes del fallamiento. El nombre de los sitios corresponde al nombre de la calle donde se ubican (Arroyo, 1999 y 2002).

Se tienen también lecturas a partir del año 1998 de 12 puntos de falla mostrados en la Figura 2.4.4, dichos puntos se han venido midiendo a través del tiempo hasta el año 2004, y que son la base fundamental de este trabajo de investigación, se muestran la grafica de asentamiento contra tiempo de los puntos de la falla 5 de Febrero, hasta el año 2004 en la Figura 2.4.5.

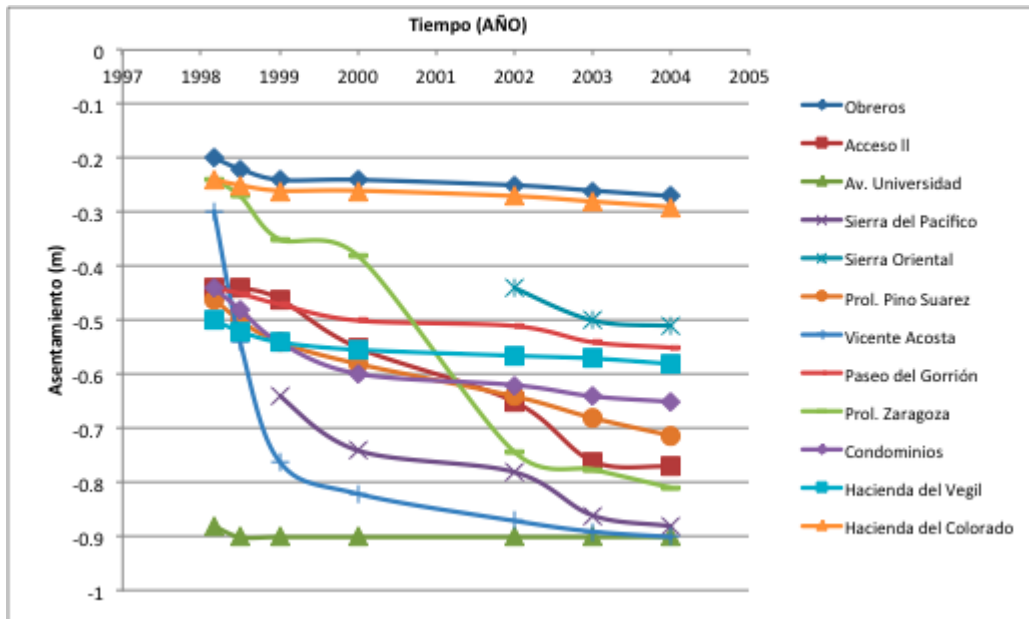


Figura 2.4.5 Asentamiento (m) de todos los puntos analizados en esta investigación en la falla 5 de febrero, con referencia al año en que se comenzaron a documentar.

2.5 MODELO ANALÍTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA SUBSIDENCIA EN FUNCIÓN DEL NIVEL VARIABLE DE AGUAS SUBTERRANEAS.

Para materializar el concepto y explicar la fenomenología de la subsidencia se presenta el caso de un acuífero libre. Para este propósito se hacen las siguientes consideraciones:

a) El agua y las partículas sólidas del subsuelo son indeformables, lo cual implica que la deformación de la masa de rellenos granulares es consecuencia de una disminución en la relación de vacíos;

b) El acuífero está constituido por material poroso continuo, con los poros y los sólidos distribuidos homogéneamente;

c) Dada la permeabilidad de media a alta del medio poroso (material permeable del acuífero) y a que el abatimiento del nivel de agua se genera muy lentamente, las fuerzas que actúan sobre la fase sólida del material granular son la gravitacional y la generada por el efecto de flotación de las partículas sólidas. Se desprecian las presiones capilares que pueden presentarse en la zona parcialmente saturada;

d) La superficie que limita a la masa saturada de la que está parcialmente saturada coincide con el nivel piezométrico;

e) No se considera el factor tiempo. Se considera que el incremento de esfuerzos se produce simultáneamente al abatimiento del nivel piezométrico.

Para el análisis de esfuerzos consideramos una columna vertical de espesor H, con área transversal A. Se considera que en la columna las partículas del relleno y los poros están repartidos homogéneamente (Figura 2.5.1).

Para la etapa inicial del proceso (Figura 2.5.1a), el peso que soporta la fase sólida del relleno granular es su peso propio (W_s) menos el efecto de flotación hidráulica que es igual al peso del agua (γ_w) desplazada por el volumen de los sólidos (V_s), esto es:

$$W_1 = W_s - \gamma_w V_s \quad 2.5.1$$

Lo cual puede escribirse como:

$$W_1 = V_s \gamma_s - \gamma_w V_s \quad 2.5.2$$

$$W_1 = V_s (\gamma_s - \gamma_w) \quad 2.5.3$$

$$\frac{W_1}{V_s} = \gamma_s - \gamma_w \quad 2.5.4$$

$$\gamma_1 = \gamma'_s \quad 2.5.5$$

El cual es el peso que actúa sobre la fase sólida de relleno por unidad de volumen de sólidos cuando la masa de material granular se encuentra sumergida y el agua se encuentra en estado hidrostático. En la ecuación 2.5.5 γ'_s es el peso volumétrico sumergido de la fase sólida del relleno.

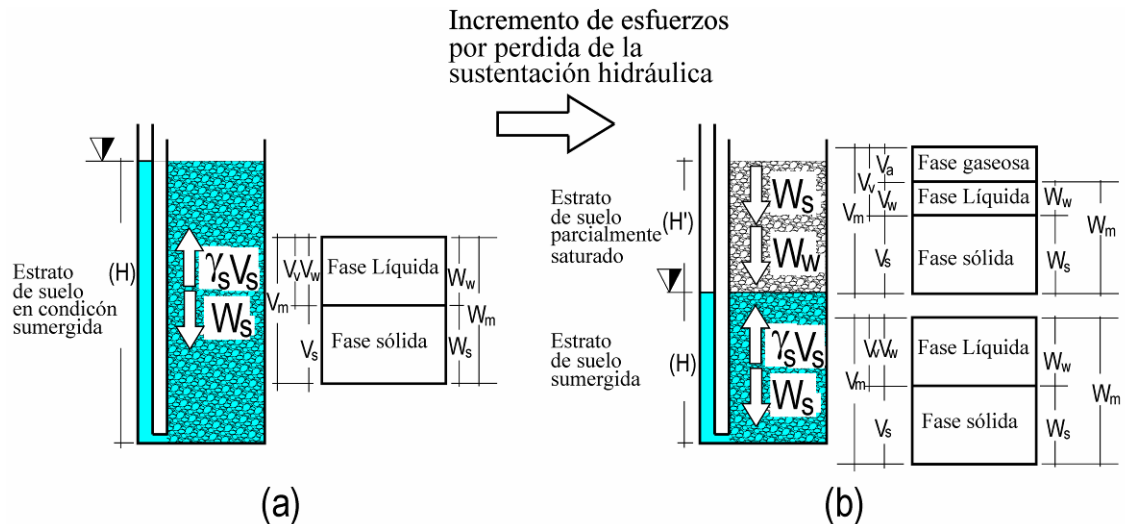


Figura 2.5.1 Columna hipotética de sedimentos granulares con los poros homogéneamente distribuidos, en la cual el área de sólidos (A_s) y el área de vacíos (A_v) son constantes para cualquier sección transversal a lo largo de la columna. Aquí V_s y V_v son el volumen de sólidos y de vacíos respectivamente, W_s y W_w son el peso de sólidos y de agua respectivamente y γ_w es el peso volumétrico del agua (Pacheco, 2007).

Cuando el nivel de agua desciende, se presentan dos estados en la masa de sedimentos: uno parcialmente saturado por arriba del nivel piezométrico y otro saturado del nivel piezométrico hacia abajo (Figura 2.5.1b).

Para la zona parcialmente saturada el esqueleto del material granular soportará su propio peso W_s más el peso del agua remanente que se encuentra en forma discontinua W_w :

$$W_2 = W_s + W_w \quad 2.5.6$$

Que puede escribirse como:

$$W_2 = W_s - \omega W_s \quad 2.5.7$$

$$W_2 = W_s(1 + \omega) \quad 2.5.8$$

$$W_2 = \gamma_s V_s(1 + \omega) \quad 2.5.9$$

$$\frac{W_2}{V_s} = \gamma_s(1 + \omega) \quad 2.5.10$$

$$\gamma_2 = \gamma_s(1 + \omega) \quad 2.5.11$$

Donde ω es el contenido de agua o humedad de la masa de sedimentos parcialmente saturada expresada en forma decimal. γ_2 Es el peso por unidad de volumen de sólidos que soporta la fase sólida del material granular cuando este se encuentra parcialmente saturado. En este peso volumétrico está incluido el efecto del peso del agua que se encuentra en el relleno granular en forma de humedad. Este peso volumétrico es diferente a γ_m y a γ_s . A este peso lo llamaremos “peso volumétrico aparente” del material granular para un estado parcialmente saturado. El peso volumétrico γ_1 (ecuación 2.5.5) es el peso volumétrico aparente de las partículas del relleno sedimentario cuando se encuentra sumergido y es igual al peso volumétrico sumergido de los sólidos γ'_s .

El abatimiento en el nivel de agua en la columna del relleno sedimentario produce un incremento en el peso que soporta el esqueleto del relleno granular, dicho incremento se produce por efecto de la pérdida de sustentación hidráulica y es igual a la diferencia de γ_1 y γ_2 .

$$\Delta\gamma = \gamma_2 - \gamma_1 \quad 2.5.12$$

Que puede escribirse como:

$$\Delta\gamma = (1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s \quad 2.5.13$$

$\Delta\gamma$ Es el peso por unidad de volumen de sólidos que provoca el esfuerzo efectivo por efecto del cual la columna de sedimentos experimenta un acortamiento cuando se abate el nivel de agua. A este peso volumétrico se le conoce como “incremento aparente del peso volumétrico” y se puede generar en cualquier tipo de relleno granular por efecto del cambio de la condición sumergida a parcialmente saturada. El concepto tiene sentido físico si se considera el efecto o sensación de pesar menos cuando estamos sumergidos hasta el cuello en una piscina y de pronto drenamos el agua, entonces sentiremos que “pesamos” más y que experimentamos un incremento en nuestro peso corporal.

El transformar los esfuerzos efectivos en “pesos volumétricos aparentes” facilita la simulación del proceso de subsidencia de un acuífero

libre, reduciendo el análisis de esfuerzos y deformaciones a un análisis inercial donde las únicas fuerzas que afectan a la masa de rellenos granulares son los pesos volumétricos aparentes $\Delta\gamma$. Se facilita además el análisis de un acuífero conformado por diferentes estratos de material (acuífero multicapa) y el análisis de las deformaciones para abatimientos parciales del nivel de agua.

Por definición el esfuerzo en el esqueleto del relleno granular por efecto de los pesos volumétricos aparentes (ecuaciones 2.5.5 y 2.5.11), cuando se transfiere al área total de la masa de rellenos granulares, es igual a la presión efectiva (presión intergranular) causada por el peso propio de la masa de relleno dada por la ecuación:

$$\bar{p} = \gamma_m H' + \gamma'_m H \quad 2.5.14$$

Esta ecuación es aplicable a acuíferos libres donde existe una zona parcialmente saturada y otra zona saturada de acuerdo con Leake y Prudic (1991) Retomando 2.5.5

$$\frac{W_1}{V_s} = \gamma'_s \quad 2.5.15$$

$$\frac{W_1}{A_s H} = \gamma'_s \quad 2.5.16$$

$$W_1 = \gamma'_s A_s H \quad 2.5.17$$

Si dividimos entre el área de la muestra en ambos términos:

$$\frac{W_1}{A} = \frac{\gamma'_s A_s H}{A} \quad 2.5.18$$

Que es la presión efectiva por peso propio para un relleno de material granular sumergido, entonces podemos escribir:

$$\bar{p}_1 = \frac{\gamma'_s A_s H}{A} \quad 2.5.19$$

Pero se sabe que $A_v = A - A_s$; además $n = \frac{A_v}{A}$, de manera que se puede poner:

$$n = \frac{A - A_s}{A} \quad 2.5.20$$

De donde resulta:

$$A_s = A(1 - n) \quad 2.5.21$$

Sustituyendo en 2.5.19 nos queda:

$$\bar{p}_1 = \gamma'_s H(1 - n) \quad 2.5.22$$

Pero:

$$\bar{p}_1 = (\gamma_s - \gamma_w)(1 - n)H \quad 2.5.23$$

$$\bar{p}_1 = [(1 - n)\gamma_s - (1 - n)\gamma_w]H \quad 2.5.24$$

$$\bar{p}_1 = [(1 - n)\gamma_s + n\gamma_w - \gamma_w]H \quad 2.5.25$$

$$\bar{p}_1 = (\gamma_m - \gamma_w)H \quad 2.5.26$$

Y finalmente:

$$\bar{p}_1 = \gamma'_m H \quad 2.5.27$$

La cual es la presión efectiva que genera el peso volumétrico aparente, cuando el relleno granular se encuentra sumergido en un acuífero en equilibrio donde no se ha generado aún un descenso del nivel de agua, y H es la profundidad medida a partir del nivel piezométrico (Figura 2.5.2).

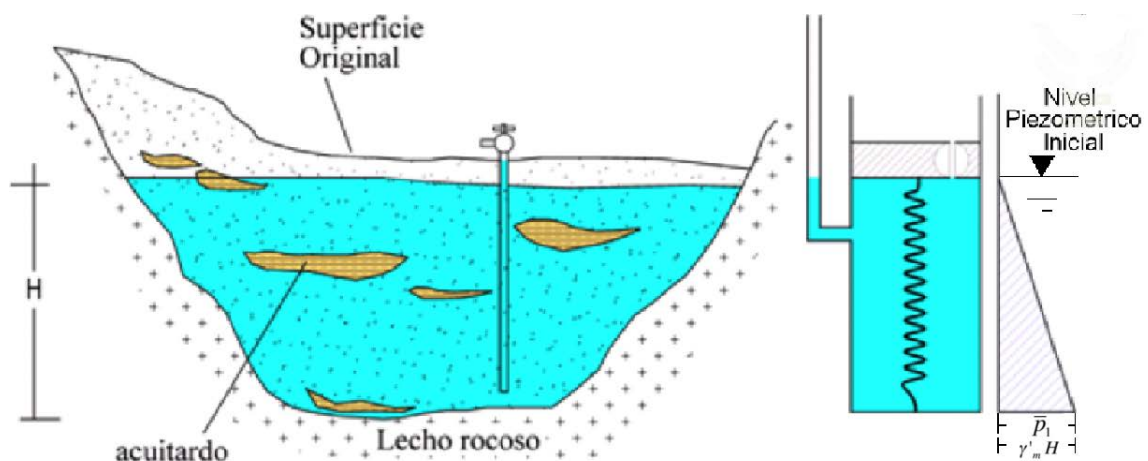


Figura 2.5.2 Esfuerzo en la parte sólida del relleno para un acuífero libre en equilibrio en un estado inicial (Pacheco, 2007).

Análogamente, si retomamos la ecuación 2.5.9

$$W_2 = \gamma_s V_s (1 + \omega) \quad 2.5.28$$

Y haciendo las mismas operaciones llegamos a:

$$\bar{p}_2 = [(1 + \omega) \gamma'_s H'] (1 - n) \quad 2.5.29$$

Por otro lado se tiene que $e = \frac{n}{(1-n)}$ y $n = \frac{e}{(1+e)}$, entonces podemos escribir:

$$(1 - n) = \frac{1}{(1 + e)} \quad 2.5.30$$

Sustituyendo en 2.5.29 tenemos:

$$\bar{p}_2 = \frac{(1 + \omega)}{(1 + e)} \gamma'_s H' \quad 2.5.31$$

Finalmente se tiene:

$$\bar{p}_2 = \gamma'_m H' \quad 2.5.32$$

Donde \bar{p}_2 es la presión efectiva que genera el peso volumétrico aparente en la zona drenada para un acuífero libre. Donde ω es el contenido de agua o humedad de la masa de rellenos drenada expresada en forma decimal y H' es la profundidad medida a partir de la parte superior del estrato drenado (Figura 2.5.3).

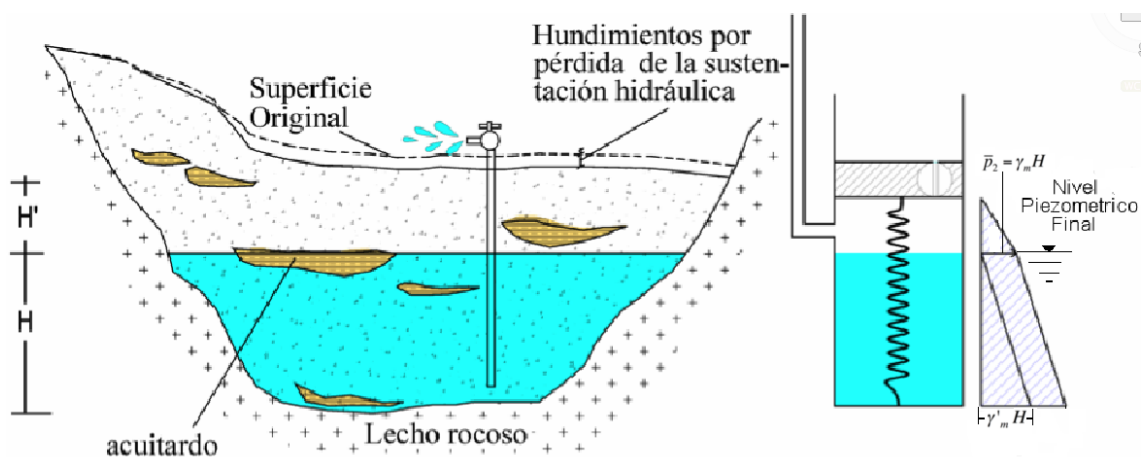


Figura 2.5.3 Hundimientos por pérdida de la sustentación hidráulica y esfuerzos en la parte sólida del relleno Granular (Pacheco, 2007)

Las ecuaciones 2.5.27 y 2.5.32 muestran el esfuerzo efectivo que producen los pesos volumétricos aparentes dados por las ecuaciones 2.5.5 y

2.5.11 para el estado saturado y parcialmente saturado respectivamente, por lo que el incremento de esfuerzos efectivos que se genera por efecto de un abatimiento del nivel de agua, es igual a la presión efectiva que produce la diferencia de estos dos pesos volumétricos aparentes, es decir el incremento aparente en el peso volumétrico dado por la ecuación 2.5.13. El incremento aparente en el peso volumétrico se genera sólo en la parte drenada, en la zona bajo el nuevo nivel piezométrico no se genera ningún cambio en el peso volumétrico aparente. Con la ecuación 2.5.13 es posible implementar un análisis de la deformación en un acuífero libre por efecto de un abatimiento del nivel de agua. El análisis se hace mediante un sistema equivalente, en donde se analiza el efecto de la gravedad en el acuífero considerando un peso volumétrico para la zona drenada (Pacheco, 2007).

2.6 MODELO DE HUNDIMIENTOS POR PÉRDIDA DE SUSTENTACIÓN HIDRÁULICA (Pacheco, 2007).

Si una columna del relleno aluvial que yace sobre un lecho rocoso experimenta un incremento de esfuerzos en la fase sólida del relleno ocasionado por el abatimiento del nivel piezométrico, la columna experimentará un acortamiento que se manifestará en superficie como un hundimiento. Se puede definir a la deformación unitaria ε de la columna de la Figura 2.6.1 como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta H}{H} \quad 2.6.1$$

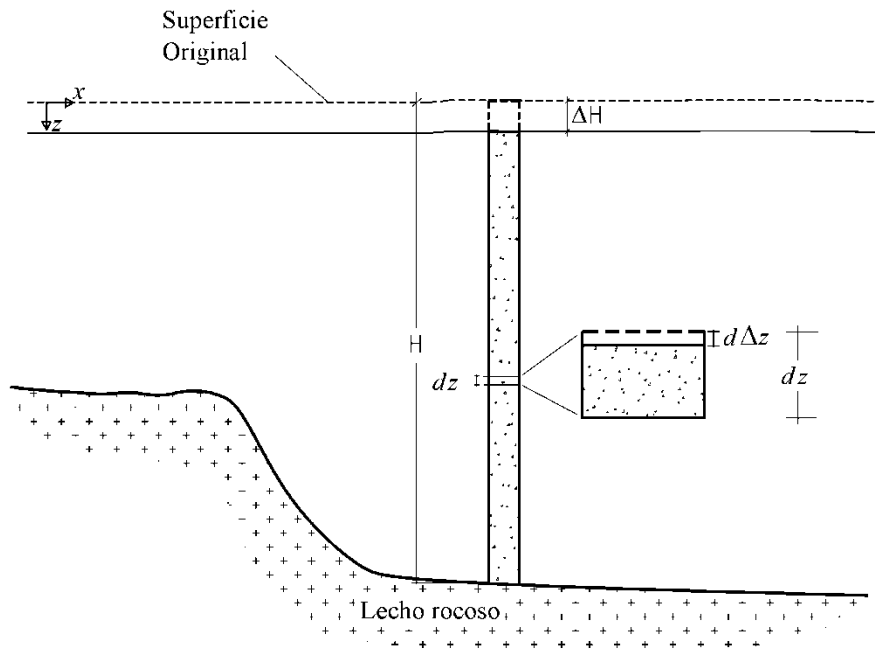


Figura 2.6.1 Columna y elemento diferencial para planteamiento de ecuación diferencial (Pacheco, 2007)

Entonces el hundimiento ΔH será:

$$\Delta H = \varepsilon H \quad 2.6.2$$

Para el elemento diferencial dz el acortamiento $d\Delta z$ será:

$$d\Delta z = \varepsilon dz \quad 2.6.3$$

Pero se puede expresar a la deformación unitaria en términos de un peso volumétrico. Es decir: $\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{\Delta W}{AE} = \frac{\Delta\gamma V}{AE} = \frac{\Delta\gamma H}{E}$, y sustituyendo en la ecuación anterior (2.6.3) para el diferencial (dz) queda:

$$d\Delta z = \frac{\gamma z}{E} dz \quad 2.6.4$$

En donde γ es el peso volumétrico que produce una deformación igual a la deformación que se genera cuando se drena un tramo "z" de la columna, es decir $\Delta\gamma$ dado por la ecuación:

$$\Delta\gamma = (1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s \quad 2.6.5$$

Integrando esta expresión desde cero hasta la profundidad H se tiene el acortamiento de la columna cuando esta drenada completamente.

$$\int_0^H d\Delta z = \int_0^H \frac{\gamma_z}{E} dz \quad 2.6.6$$

$$\Delta H = \int_0^H \frac{\gamma_z}{E} dz \quad 2.6.7$$

En esta expresión sustituimos el incremento aparente en el peso volumétrico $\Delta\gamma$ dado por la ecuación 2.5.13, y consideramos un abatimiento dado por H' (Figura 2.5.3)

$$\Delta H' = \int_0^H \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]z}{E} dz \quad 2.6.8$$

$$\Delta H' = \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]}{E} \int_0^H z dz \quad 2.6.9$$

De donde:

$$\Delta H' = \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]}{2E} H'^2 \quad 2.6.10$$

Esta ecuación representa la deformación vertical que se presentará en el estrato parcialmente saturado por efecto de la pérdida de sustentación hidráulica causada por un abatimiento del nivel piezométrico.

Para la zona saturada el hundimiento se calcula haciendo $z = H'$ en la ecuación 2.6.7, e integrando para toda la longitud sumergida de la columna (H), es decir:

$$\Delta H = \int_0^H \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]}{E} H' dz \quad 2.6.11$$

O bien:

$$\Delta H = \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]H'}{E} \int_0^H dz \quad 2.6.12$$

Y por lo tanto:

$$\Delta H = \left\{ \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]H'}{E} \right\} H \quad 2.6.13$$

La expresión 2.6.13 es la deformación vertical que se presentará en el estrato saturado que se encuentra bajo el nivel piezométrico. Tal deformación es provocada por la pérdida de sustentación hidráulica que se genera en la zona drenada por encima del nivel piezométrico cuando dicho nivel desciende. El hundimiento total estará dado entonces por la suma de las deformaciones verticales de ambos estratos, el parcialmente saturado (ecuación 2.6.10) y el saturado (ecuación 2.6.13).

El hundimiento total de acuerdo con las ecuaciones 2.6.10 y 2.6.13, está en función del abatimiento H' , del peso volumétrico de los sólidos, del contenido de humedad remanente en la zona drenada y del modulo de elasticidad del material granular. El contenido de agua y el peso volumétrico de los sólidos son propiedades del medio granular que se pueden obtener de muestras alteradas, por lo que su obtención no requiere de un muestreo engorroso y caro como lo es la recuperación de muestras inalteradas. No obstante que los valores de la humedad pueden tener variaciones importantes dependiendo la profundidad (Pacheco, 2007).

2.7 MODELOS CONCEPTUALES DE GENERACIÓN DE AGRIETAMIENTOS EN SUELOS NO SATURADOS.

Las condiciones de frontera son los límites impuestos a la masa de material granular que está bajo la influencia de esfuerzos y cuya principal característica es que son indeformables. En el caso general de una cuenca sedimentaria de origen tectónico que forma estructuras de graben, el tipo de frontera física consiste en un basamento rocoso cuya morfología modifica el campo de deformaciones de la masa de sedimentos drenada. Las

deformaciones del lecho rocoso comparadas con la deformación que sufre el estrato del acuífero bajo un intenso régimen de extracción se consideran insignificantes, es decir para fines prácticos se considera nula.

Para el Valle de Querétaro, se ha observado en recorridos de campo que los agrietamientos coinciden con los límites de las zonas de hundimientos y generalmente se alinean con las estructuras geológicas regionales que definen el graben. Además, el análisis de los perfiles gravimétricos medidos sobre los callamientos, muestra una amplitud importante en la anomalía que puede ser asociada espacialmente con el sitio donde se cruza el perfil gravimétrico con el agrietamiento. Estos elementos permiten sostener la hipótesis de que el mecanismo que controla la generación de agrietamientos en el valle de Querétaro es el de hundimientos diferenciales provocados por un lecho rocoso con topografía irregular.

Los hundimientos diferenciales se generan cuando en las zonas menos profundas del acuífero el espesor de sedimentos desarrolla menor deformación vertical, mientras que en las partes más profundas el espesor de sedimentos desarrolla mayor deformación vertical. Esto provoca que la porción de material granular sujeto a una deformación vertical mayor “jale” a la porción de sedimentos que experimenta menor deformación vertical hacia la parte más profunda del acuífero causando que el movimiento de las partículas del relleno tenga una componente horizontal. El movimiento de las partículas provoca deformaciones de extensión y en consecuencia agrietamientos en la masa de material granular (figura 2.7.1).

La figura 2.7.1 muestra esquemáticamente tres configuraciones del lecho rocoso que se propone pueden generar agrietamientos si el nivel piezométrico desciende debajo de un nivel crítico.

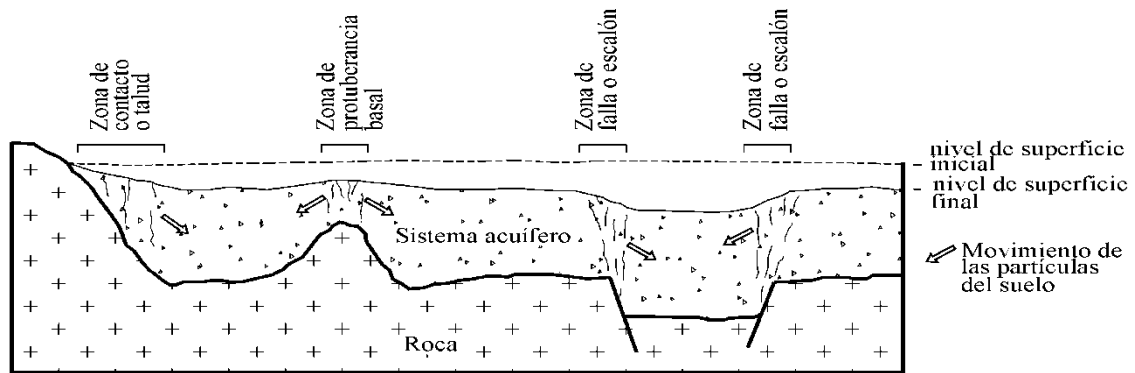


Figura 2.7.1 Configuraciones del lecho rocoso que pueden generar agrietamientos (Pacheco, 2007)

Por otro lado las expresiones para el cálculo de hundimientos en una columna de sedimentos granulares definidas en la sección anterior para la zona parcialmente saturada y saturada son respectivamente:

$$\Delta H' = \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s]}{2E} H'^2 \quad 2.7.1$$

$$\Delta H = \left\{ \frac{[(1 + \omega)\gamma_s - \gamma'_s] H'}{E} \right\} H \quad 2.7.2$$

La ecuación 2.7.1 para los cálculos del hundimiento en la zona drenada muestra una variación cuadrática con respecto al espesor H' , lo que indica que las deformaciones a lo largo de la columna se incrementarán con la profundidad, mientras que en la zona saturada, de acuerdo con la expresión 2.7.2, el acortamiento de la columna es una función lineal del espesor H , por lo tanto las deformaciones a lo largo de la columna en la zona saturada son constantes (Figura 2.7.2).

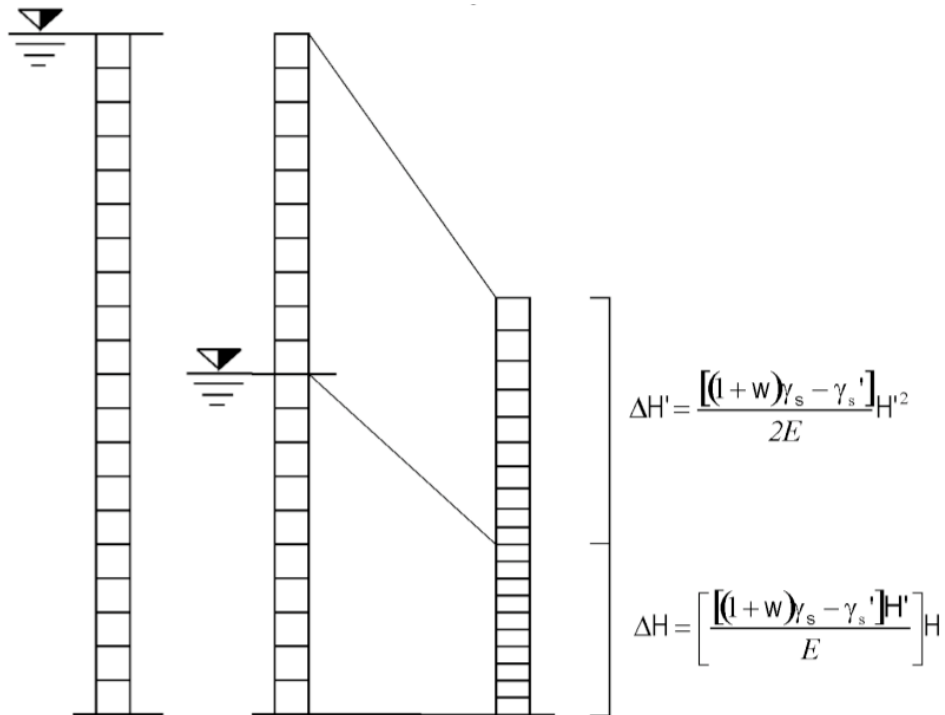


Figura 2.7.2 Acortamiento y deformaciones en la zona drenada y zona saturada en una columna de rellenos granulares que experimenta un descenso en el nivel de agua (Pacheco, 2007).

No sólo la forma del lecho rocoso influye en la generación de agrietamientos, también su profundidad parece ser factor clave. Una configuración del lecho rocoso con ciertas dimensiones puede no ser crítica para la generación de agrietamientos a cierta profundidad, mientras que la misma configuración con las mismas dimensiones puede ser determinante a una profundidad menor. Estos dos factores, la forma y profundidad de la irregularidad en el lecho rocoso, junto con la presencia de un acuífero formado por materiales con baja plasticidad forman el escenario potencial para que se generen agrietamientos. El detonante o disparador del fenómeno es el abatimiento en el nivel piezométrico.

CAPITULO 3 MARCO TEÓRICO.

En esta investigación de tesis, se describen los asentamientos relativos, dichos asentamientos son aplicables solamente para materiales que pueden regresar a su estado original sin sufrir ninguna deformación, esto quiere decir que se basa en la teoría de la elasticidad de Hooke, los asentamientos plásticos no se contemplan, por tanto, los valores de asentamiento relativo mostrados son elásticos.

3.1 LEY DE HOOKE.

La relación entre cada uno de los tres tipos de esfuerzo (tensor-normal-tangencial) y sus correspondientes deformaciones desempeña una función importante en la rama de la física denominada teoría de elasticidad o su equivalente de ingeniería, resistencias de materiales. Si se dibuja una gráfica del esfuerzo en función de la correspondiente deformación, se encuentra que el diagrama resultante esfuerzo-deformación presenta formas diferentes dependiendo del tipo de material (Figura 3.1.1).

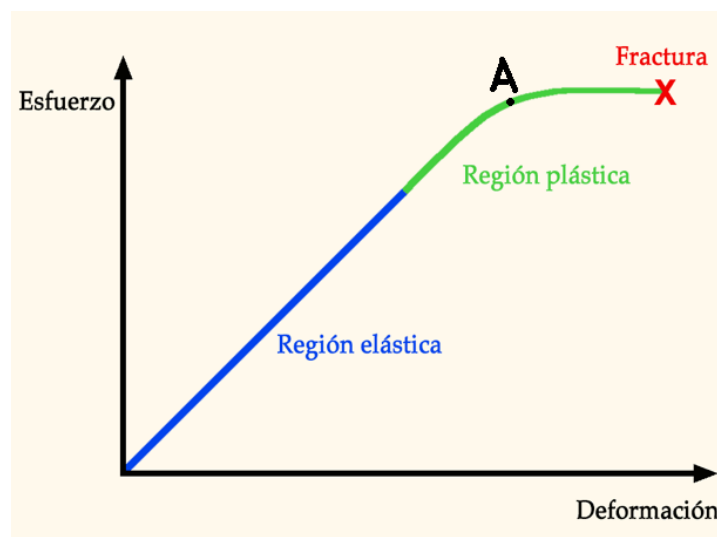


Figura 3.1.1 Gráfica de Esfuerzo vs Deformación para un material dado.

En la primera parte de la curva el esfuerzo y la deformación son proporcionales hasta el final de la línea azul, que es el límite de proporcionalidad .

El hecho de que haya una región en la que el esfuerzo y la deformación son proporcionales, se denomina Ley de Hooke. El esfuerzo y la deformación son proporcionales, no obstante, si se suprime el esfuerzo entre el tramo de la línea azul hasta el punto A, la curva recorrerá el itinerario inverso y el material recuperará su longitud inicial, se dice que el material es elástico o que presenta comportamiento elástico, y el punto A se denomina límite de elasticidad o punto cedente. Hasta alcanzar este punto, las fuerzas ejercidas por el material son conservativas; cuando el material vuelve a su forma original, se recupera el trabajo realizado en la producción de la deformación. Se dice que la deformación es reversible.

La mayor parte de las estructuras se diseñan para sufrir pequeñas deformaciones, que involucran solo la parte lineal del diagrama esfuerzo-deformación, donde el esfuerzo σ es directamente proporcional a la deformación unitaria ε y puede (ecuación 3.1.1).

$$\sigma = \varepsilon E \quad 3.1.1$$

Donde E es el módulo de elasticidad o módulo de Young, que varía conforme al material estudiado.

Y ε descrito en el modelo de hundimientos en Mecánica de suelos (ecuación 2.6.1), es posible realizar el cálculo de un esfuerzo, combinando las ecuaciones 3.1.1 y 2.6.1 (ecuación 4.1.2)

$$\sigma = \frac{\Delta H}{H_0} E \quad 3.1.2$$

Despejando ΔH se tiene:

$$\Delta H = \frac{\sigma}{E} H_0 \quad 3.1.3$$

La ecuación 3.1.3 se utiliza en este trabajo de tesis para el cálculo de asentamientos relativos en Esfuerzos Efectivos.

3.2 MÉTODO DE SUSTENTACIÓN HIDRÁULICA CORREGIDO.

Gran parte de esta investigación de tesis es gracias al método de sustentación hidráulica de Pacheco (2007), el cual tiene como objetivo principal obtener el asentamiento para suelos no saturados una vez determinada la geología del sitio.

No obstante cuando se revisó el planteamiento de este método se encontraron ciertas discrepancias en cómo llegar a las ecuaciones de asentamiento (ecuación 2.7.1 y 2.7.2), que se plantearon en el método de sustentación hidráulica, dichas ecuaciones se analizaron y corrigieron hasta llegar a un nuevo resultado (ecuación 3.2.8), el cual nos permite calcular el asentamiento por medio de los módulos de elasticidad del material (E), la humedad ω , y el la altura del nivel de abatimiento del agua.

En el capítulo de Antecedentes de esta investigación, Subcapítulo 2.6 fue donde se realizaron las correcciones, en la ecuación 2.6.11, donde se calculo el asentamiento haciendo $z=H'$. Pero en donde en realidad el asentamiento ocurre haciendo $z=H$, refiriéndose a la zona saturada (Figura 2.5.2), de esta manera y realizando la integración de 0 a H con respecto a z, se obtuvo la ecuación 3.2.1

$$\Delta H = \int_H^0 \frac{[(1+\omega)\gamma_s - \gamma'_s]}{E} z dz \quad 3.2.1$$

Que reduciendo:

$$\Delta H = \frac{(1+\omega)\gamma_s - \gamma'_s}{E} \int_H^0 z dz \quad 3.2.2$$

Integrando:

$$\Delta H = -\frac{[(1+\omega)\gamma_s - \gamma'_s]}{2E} H^2 \quad 3.2.3$$

Reduciendo:

$$\Delta H = \frac{\gamma'_s - (1+\omega)\gamma_s}{2E} H^2 \quad 3.2.4$$

Con la ecuación 3.2.4 se puede obtener el asentamiento según la Figura 2.5.3 de la siguiente manera:

1. Para material Saturado, haciendo $H'=0$ (ecuación 3.2.5).

$$\Delta H = \frac{\gamma'_s - \gamma_s(1+\omega)}{2E} H^2 \quad 3.2.5$$

2. Para material No Saturado, haciendo $H' \neq 0$ (ecuación 3.2.6).

$$\Delta H = \frac{(1+\omega)\gamma_s - \gamma'_s}{2E} H'^2 + \frac{\gamma'_s - \gamma_s(1+\omega)}{2E} H^2 \quad 3.2.6$$

3. Para material sin presencia de agua, $H'=H$ (ecuación 3.2.7).

$$\Delta H = \frac{(1+\omega)\gamma_s - \gamma'_s}{2E} H'^2 \quad 3.2.7$$

Pero como tomando en cuenta la teoría de consolidación de Terzaghi (1956), se sabe que el suelo no se consolida a menos que exista drenaje, que para el caso de esta investigación no existe, se deduce que el asentamiento solo se presenta para material no saturado, de esta manera y tomando en cuenta las ecuaciones 3.2.5, 3.2.6 y 3.2.7, el asentamiento se limita a la ecuación 3.2.8.

$$\Delta H = \frac{(1+\omega)\gamma_s + \gamma'_s}{2E} H'^2 \quad 3.2.8$$

CAPITULO 4 MATERIALES Y MÉTODOS.

En este capítulo se analizaron el método de Esfuerzos Efectivos Terzaghi (1956) y el método de sustentación hidráulica corregido de Pacheco (2007), en los mismos puntos de falla que abarca esta investigación, de la misma manera se muestran las lecturas de asentamiento obtenidas en sitio, los mapas geográficos y el nivel de abatimiento del agua en la zona de investigación.

4.1 MATERIALES.

Se tomaron lecturas de los diferenciales verticales de cada punto analizado para ello se utilizó una estación total, GPS (Figura 4.1), y programas de cómputo tales como Surfer 10, Office 2010, ArcGis 9.3, Google Earth 2011, AutoCad 2011, Microsoft Paint, CivilCad 2009, Office 2011, Adobe Photoshop 3.0, PhotoBooth, iWork, entre otros de los que se obtuvieron los diferenciales verticales, las coordenadas geográficas y métricas.



Figura 4.1 Se muestra la utilización de la Estación total y GPS.

4.2 LECTURAS DEL DIFERENCIAL VERTICAL EN LA FALLA 5 DE FEBRERO.

Como base del estudio de asentamientos relativos en la falla 5 de Febrero fue necesario obtener los asentamientos de los puntos a analizar, se contemplaron 12 puntos que componen esta falla, los cuales se observa de manera pronunciada el diferencial vertical, dicho diferencial afecta a edificaciones a simple vista y a ductos de agua petróleo sepultados bajo los estratos granulares, de esta manera es importante analizar cuál es el posible asentamiento relativo máximo que se puede presentar en cada punto analizado y el tiempo en que pudiera llegar al equilibrio.

Con el GPS se obtuvieron las coordenadas geográficas las cuales se transformaron a UTM que son las más utilizadas en referencias geográficas, además se georeferenciaron los mapas del estado con base en los datos obtenidos por el INEGI.

El diferencial vertical fue tomado en cada uno de los 12 puntos de falla. A esto se le conoce como asentamiento relativo (m), el cual es mostrado en la Figura 4.2.1.



Figura 4.2.1 Diferencial Vertical en la parte Sur de la Falla 5 de Febrero.

Para cada uno de los puntos analizados fue necesario tomar sus coordenadas geográficas de la región 14 que pueden servir de referencia en investigaciones donde se trabaje en este sistema geográfico, éstas se muestran en la Tabla 4.2.1

Calle/Coordenada	NORTE	OESTE
Obreros	20°36'39.09"	100°25'0.61"
Acceso II	20°36'8.38"	100°24'56.33"
Av. Universidad	20°35'42.28"	100°24'59.58"
Sierra del Pacífico	20°35'36.12"	100°24'58.81"
Sierra Oriental	20°35'39.24"	100°24'59.92"
Prol. Pino Suárez	20°35'2.23"	100°24'51.35"
Vicente Acosta	20°34'59.39"	100°24'49.98"
Gorrión	20°34'55.18"	100°24'46.64"
Prol. Zaragoza	20°34'46.19"	100°24'46.61"
Condominios	20°34'34.43"	100°24'45.02"
Hacienda Vegil	20°34'31.91"	100°24'44.70"
Hacienda del Colorado	20°34'25.37"	100°24'41.96"

Tabla 4.2.1 Coordenadas geográficas de los puntos analizados en la Falla 5 de Febrero.

De igual manera se trabajo en la georeferenciacion de las coordenadas UTM que son las mas usuales en cartas geográficas y de investigaciones Geológicas y Geofísicas, las cuales se muestran en la Tabla 4.2.2.

Calle/coord UTM	X	Y
Obreros	352360.24	2279723.93
Acceso II	352475.934	2278778.57
Av. Universidad	352374.857	2277976.87
Sierra del Pacífico	352395.505	2277787.26
Sierra Oriental	352364.205	2277883.48
Prol. Pino Suárez	352602.447	2276743.34
Vicente Acosta	352641.362	2276655.67
Paseo del Gorrión	352736.942	2276525.38
Prol. Zaragoza	352735.421	2276248.95
Condominios	352778.32	2275886.95
Hacienda Vegil	352786.915	2275809.39
Hacienda del Colorado	352864.514	2275607.61

Tabla 4.2.2 Coordenadas UTM de los puntos analizados en la Falla 5 de Febrero.

Existen lecturas de cada uno de los puntos analizados desde el año 1998 hasta el año 2004, es por eso que en este trabajo de investigación se actualizaron los datos hasta el año 2010, que fue cuando se realizaron las ultimas lecturas de los diferenciales verticales, con esto se actualiza la Figura

2.4.5 del capítulo de Antecedentes, dicha actualización se muestra en la Figura 4.2.2.

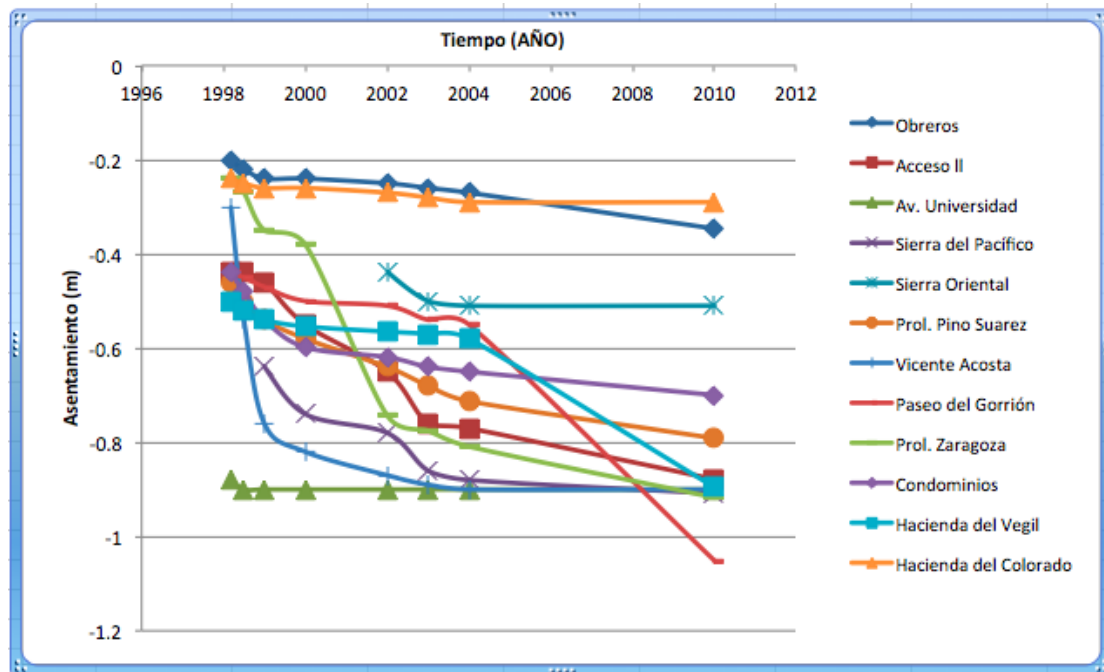


Figura 4.2.2 Actualización de los diferenciales verticales para los puntos de la Falla 5 de Febrero.

Algunos datos de asentamiento se interpolaron de manera logarítmica y se anexaron a la Tabla 4.2.3, los espacios vacíos significan que es difícil interpolar porque podrían resultar con un error mayor al 4%, es por eso que se dejaron en blanco.

Punto/Asent (m)	1998.17	1998.50	1999	2000	2002	2003	2004	2010
Obreros	0.2	0.22	0.24	0.24	0.25	0.26	0.27	0.3463
Acceso II	0.44	0.44	0.46	0.55	0.65	0.76	0.77	0.8786
Av. Universidad	0.88	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Sierra del Pacífico	////	////	0.64	0.74	0.78	0.86	0.88	0.9087
Sierra Oriental	////	////	////	////	0.44	0.5	0.51	0.51
Prol. Pino Suarez	0.46	0.5	0.54	0.58	0.64	0.68	0.7127	0.7914
Vicente Acosta	0.3	0.54	0.76	0.82	0.87	0.89	0.9	0.9
Paseo del Gorrión	0.44	0.45	0.47	0.5	0.51	0.54	0.55	1.051
Prol. Zaragoza	0.24	0.27	0.35	0.38	0.7427	0.77508	0.8089	0.9171
Condominios	0.44	0.48	0.54	0.554	0.5649	0.57	0.58	0.8954
Hacienda Velgil	0.5	0.52	0.54	0.554	0.5649	0.57	0.58	0.8954
Hacienda del Colorado	0.24	0.25	0.26	0.26	0.27	0.28	0.29	0.29

Tabla 4.2.3 Datos de asentamiento contra tiempo desde el año 1998 hasta el año 2010.

4.3 NIVEL DE ABATIMIENTO DEL AGUA DE LA RED PIEZOMÉTRICA, EN EL VALLE DE QUERÉTARO(CEA, 2011).

Es importante tomar en cuenta el nivel de abatimiento del agua a través del tiempo cuando se habla de subsidencia ya que infiere directamente

en los niveles de asentamiento de la superficie del suelo, por ello se solicitó información acerca de éstos a la Comisión Estatal de Aguas ubicada en la Avenida 5 de Febrero No. 35, la cual cuenta con la red piezométrica y los niveles estáticos del agua desde el año 1970 hasta diciembre de 2011, dicha red contempla 38 pozos de extracción de agua potable los cuales cuentan con información incompleta en algunos años, por esa razón se descartaron 12 pozos, y en los otros 26 se realizó un trabajo de interpolación logarítmica, la cual se muestra en los resultados en color azul, ya que los de letra negra son los proporcionados por la CEA a los cuales no se les realizó ninguna modificación para tener completo el análisis de abatimiento del agua a través del tiempo en el Valle de Querétaro (Tabla 4.3.1).

En esta investigación es necesario hacer énfasis del abatimiento del nivel de aguas subterráneas ya que con éste es posible hacer una comparación directa entre los asentamientos en las diferentes capas de la geología del valle de Querétaro con diferentes módulos de elasticidad por esfuerzos efectivos y los métodos utilizados que es el objetivo principal en esta investigación.

No.	No. C.N.A	Nombre del pozo	X (UTM)	Y (UTM)	Elevación de Brocal msnm	Nivel Estático o Dic. 1970	Nivel Estático o Dic. 1975	Nivel Estático o Dic. 1980	Nivel Estático o Dic. 1985	Nivel Estático o Dic. 1990	Nivel Estático o Dic. 1994	Nivel Estático o Dic. 1996	Nivel Estático o Dic. 1997	Nivel Estático o Dic. 1998	Nivel Estático o Dic. 1999	Nivel Estático o Dic. 2000	Nivel Estático o Dic. 2001	Nivel Estático o Dic. 2002	Nivel Estático o Dic. 2003	Nivel Estático o Dic. 2004	Nivel Estático o Dic. 2005	Nivel Estático o Dic. 2006	Nivel Estático o Dic. 2007	Nivel Estático o Dic. 2008	Nivel Estático o Dic. 2009	Nivel Estático o Dic. 2010	Nivel Estático o Dic. Mayo 2011	
1	759	Ejido el Nabo	347166	2292086	1,950.33	15.37	23.99	32.58	41.16	52.70	55.80	59.85	61.63	62.25	64.56	64.68	67.20	71.10	66.50	69.90	73.85	74.20	77.05	88.64	80.42	81.44	86.40	86.58
2	2041	CEA El Nabo	345371	2288268	1,899.90	14.75	24.15	28.78	39.89	43.20	45.12	49.62	58.62	63.12	67.02	68.40	69.18	81.61	106.47	118.90	118.00	119.50	123.35	131.05	134.90	123.62	125.48	126.40
3	1978	CEA Loma Bonita	349818	2284988	1,816.52	64.30	66.24	72.09	73.11	79.00	80.42	80.61	81.80	84.18	83.76	83.63	83.50	83.35	83.20	83.90	63.80	64.80	63.05	63.50	62.90	62.60	62.33	62.05
4	1434	Bachoco	351004	2283393	1,813.73	28.13	31.34	33.56	38.50	40.20	43.44	44.58	42.92	44.75	44.49	44.00	47.01	44.61	42.20	40.85	40.90	41.30	39.50	38.90	42.50	37.49	36.30	35.80
5	2427	Sta. Ma. Magdalena III	346893	2279228	1,799.50	45.91	57.32	68.69	80.03	97.00	97.60	100.53	103.46	105.72	109.97	112.87	115.79	118.69	121.60	123.40	125.10	126.80	126.75	132.00	134.62	144.60	136.25	133.10
6	1010	Uniroyal No. 2	351038	2281812	1,805.07	43.00	59.60	65.90	70.60	83.00	85.50	97.40	101.77	104.88	109.53	110.56	108.93	110.20	117.80	112.68	114.45	115.90	117.05	119.24	121.77	123.05	123.92	124.10
7	1973	CEA San Pedro Martir IV	347432	2281192	1,800.35	30.15	48.88	67.57	86.30	104.79	119.21	136.24	141.60	144.70	149.95	152.41	154.88	157.34	159.80	158.25	163.90	164.50	167.60	167.30	167.50	168.80	170.30	169.66
8	609-A	Rcho El Rincón	345265	2281054	1,806.28	51.44	62.56	73.66	84.73	90.00	101.59	108.97	112.06	113.63	120.13	123.00	125.86	126.33	126.80	130.40	130.60	132.00	132.50	132.70	133.15	134.30	141.79	142.94
9	1638	Vidriera Qro. Nte.	351229	2280079	1,804.32	43.14	54.01	64.85	75.67	82.00	92.60	97.47	101.74	106.00	109.26	112.10	112.02	112.02	112.20	118.00	120.20	122.00	123.00	124.33	125.67	126.62	128.83	129.50
10	1313-A	Rcho El Rosario	346341	2279716	1,799.25	26.67	41.23	55.76	70.25	77.00	86.47	103.87	107.88	111.89	116.70	118.40	118.05	119.08	121.17	125.36	127.45	129.54	133.72	135.82	137.80	139.15	141.40	140.00
11	953	Singer Mexicana No. 2	352618	2279064	1,807.69	73.19	80.59	87.96	95.32	97.00	105.03	112.14	113.88	116.25	118.85	120.64	122.42	124.21	126.00	121.00	122.50	123.30	125.07	125.20	130.68	131.95	132.08	132.20
12	612-F	Rcho. La Colmena	344440	2279792	1,803.72	34.64	39.75	51.55	62.95	84.83	92.05	105.07	103.08	105.92	110.10	111.60	114.44	117.27	120.11	120.50	121.00	125.00	133.05	134.10	137.16	137.70	138.84	142.73
13	752	Alberca Leticia	358102	2278755	1,840.13	12.54	12.84	23.50	34.64	41.14	43.47	44.41	45.35	46.71	48.07	49.09	50.10	50.90	46.67	42.45	42.08	43.20	48.72	46.76	44.20	47.20	46.65	45.28
14	977-A	Tecnológico	351991	2278559	1,810.75	50.73	62.00	73.24	84.46	95.04	99.30	115.64	109.85	112.15	113.40	116.74	119.04	121.33	123.62	125.92	131.50	132.30	136.75	137.60	138.26	138.26	138.13	138.00
15	982	Rcho. Las Adjuntas	344744	2278574	1,798.97	45.00	47.40	49.80	59.87	70.18	80.48	90.79	101.10	102.30	103.50	106.20	110.27	114.35	114.80	115.96	118.30	120.63	122.97	124.14	134.74	135.30	136.20	137.10
16	745	Colegio Fray Luis	353095	2277032	1,813.83	66.54	76.63	86.69	96.72	112.14	113.90	115.07	116.25	121.72	125.21	126.67	128.66	130.65	132.63	134.62	136.60	138.59	140.57	142.55	149.78	150.10	148.50	146.90
17	914	CEA Capilla 1	350834	2276380	1,803.06	38.00	41.30	45.60	62.35	83.05	94.04	101.29	106.00	106.96	115.20	112.64	115.47	118.30	124.50	123.97	129.50	131.00	132.45	135.72	138.10	140.92	141.20	141.05
18	988-A	CEA Expositor No. 2-B	356650	2276136	1,818.00	20.49	40.51	60.48	80.39	94.51	98.50	110.98	127.56	144.14	148.50	150.40	149.62	150.30	155.63	155.65	162.72	163.50	165.94	168.39	171.46	174.53	175.82	175.80
19	653-A	Ejido Sta. Virginia	349900	2274577	1,803.54	48.07	54.76	61.43	68.08	74.06	76.70	82.66	83.98	85.30	86.62	87.94	89.26	90.58	91.89	95.00	96.70	98.30	98.84	96.45	98.95	100.12	98.80	99.00
20	628	Rcho. Vanegas	350536	2274107	1,805.25	34.90	45.20	52.94	64.23	81.18	85.00	106.04	105.77	108.67	118.03	120.63	124.15	120.26	123.50	128.70	133.45	134.50	134.71	135.45	143.26	144.20	144.65	142.40
21	629	El Cerrito Frc. 2	348247	2273979	1,807.54	31.88	46.21	60.51	74.77	88.60	94.28	106.29	108.85	113.82	119.10	120.17	119.60	129.13	129.85	130.45	130.60	132.00	139.62	138.10	143.60	144.00	145.44	148.36
22	1935	Ejido Los Angeles	345579	2273859	1,837.70	61.43	75.36	89.25	103.11	117.00	124.95	136.31	140.84	143.74	141.73	139.10	144.80	145.60	155.00	159.69	162.00	162.79	163.68	160.05	164.50	171.89	173.03	181.48
23	641-A	CEA Tejeda	351815	2272915	1,809.01	40.00	46.28	56.65	69.16	80.00	83.90	85.90	104.24	90.46	92.90	112.77	115.61	118.46	120.00	131.40	132.00	132.90	132.64	141.90	146.00	147.70	147.85	144.85
24	1746-A	CEA El Pueblito 2A	349450	2272271	1,805.00	36.73	51.53	66.29	81.01	96.00	96.80	112.69	118.17	119.11	122.03	122.30	131.93	137.32	136.15	138.40	141.68	142.86	142.90	144.00	150.80	152.30	153.28	153.78
25	1905	CEA Reforma Agraria	353795	2272498	1,900.00	134.71	147.74	160.74	173.70	189.00	191.00	202.11	203.59	206.50	211.12	212.40	214.97	217.54	220.10	222.67	228.91	230.00	232.00	235.00	236.75	236.90	237.10	235.00
26	999-A	Ejido El Romeral	343449	2271929	1,829.11	54.77	68.94	83.07	97.17	105.00	119.20	127.30	131.37	134.25	140.06	141.57	144.10	149.76	149.70	151.00	155.17	156.20	155.08	158.90	165.50	167.12	164.60	165.80

Figura 4.3.1 Nivel de Abatimiento del agua de la red Piezométrica del Valle de Querétaro monitoreada por la CEA, 2011.

Con los resultados obtenidos de la CEA, 2011 es posible tomar en cuenta el nivel de abatimiento del agua en la zona estudiada ya que la red piezométrica abarca gran parte del Valle de Querétaro en la zona Urbana, cuyos datos se interpolaron en ArcGis 9.3 por los métodos IDW y Kriging y se tomo el abatimiento en cada uno de los puntos de falla a través del tiempo (Tabla 4.3.2).

Pto/Abat (m)	1970	1975	1980	1985	1990	1998	2000	2005	2010	2011
Obreros	51.8	61.9	72.0	82.2	88.7	107.5	112.8	117.0	124.9	125.9
Acceso II	55.0	66.0	77.0	88.6	97.7	114.1	119.1	126.7	135.4	135.2
Av. Universidad	54.3	64.5	75.0	87.1	99.2	115.7	120.3	131.4	141.3	140.3
Sierra Oriental	55.1	65.1	75.1	86.9	99.1	115.5	120.2	131.6	141.6	140.5
Sierra del Pacifico	55.2	65.1	75.1	87.0	99.6	115.6	120.5	131.8	142.0	140.9
Prol. Pino Suarez	56.2	66.0	76.0	88.5	104.2	119.2	124.9	137.1	149.2	147.0
Vicente Acosta	56.4	66.2	76.2	88.8	104.9	119.8	125.6	137.9	150.0	147.8
Paseo del Gorrion	56.8	66.8	77.0	89.5	105.7	120.9	127.0	139.2	151.6	149.1
Prol. Zaragoza	56.8	66.8	77.0	89.5	105.7	121.8	128.5	141.1	153.5	151.0
Condominios	57.2	67.3	77.6	90.3	106.5	123.5	131.1	144.2	156.5	153.9
Hda del Vegil	57.3	67.5	77.9	90.7	106.9	124.0	131.7	144.9	157.2	154.6
Hda del Colorado	58.2	68.4	79.1	92.0	108.1	125.8	133.9	147.4	159.7	157.0

Tabla 4.3.2 Nivel de abatimiento del agua (m) en la zona estudiada.

Con los datos de la tabla anteriores (Tabla 4.3.1), se georeferenciaron los sitios de abatimiento del nivel de agua en el Valle de Querétaro en la Tabla 4.3.1 donde se muestran los puntos de falla de la zona estudiada y los niveles de abatimiento.

Los puntos de la Falla 5 de Febrero observados en la Figura 4.3.2 de esta investigación sólo se analizaron los asentamientos relativos desde el año 1970 hasta Diciembre del año 2011. Además Pacheco (2007), realizó un estudio de los perfiles gravimétricos, los cuales tienen como fronteras pozos conocidos por la CNA y en cuya línea de perfil se conoce cada uno de los estratos de los puntos estudiados (Figura 4.3.1).

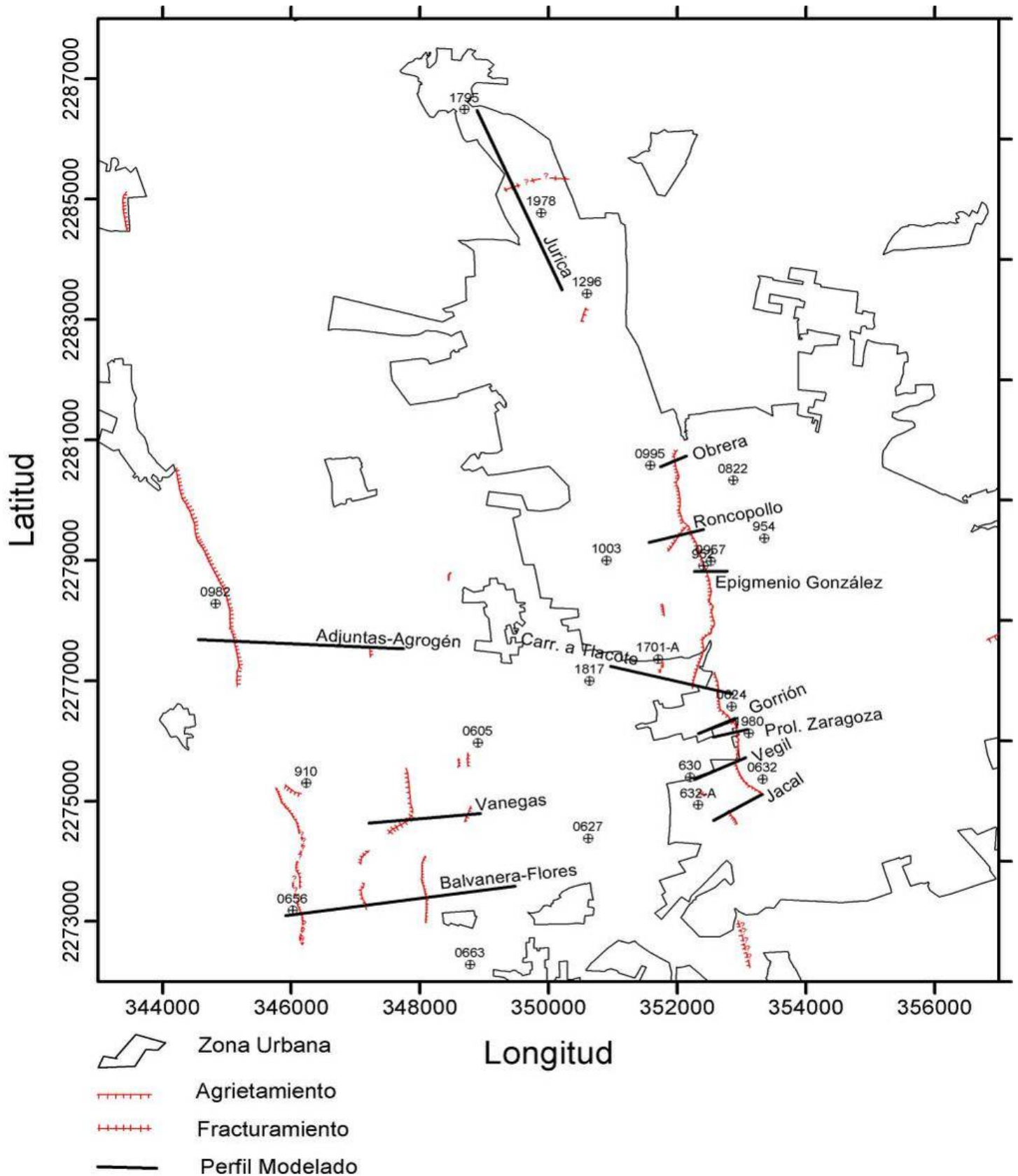


Figura 4.3.1 Ubicación de los perfiles gravimétricos modelados y los pozos utilizados para calibrar los modelos (Pacheco, 2007).

Con base a los niveles de abatimiento del nivel de aguas subterráneas proporcionados por la CEA 2011, se interpolaron los datos con el programa ArcGis 9.3, mostrando el abatimiento en metros mediante curvas de nivel de la zona urbana de Querétaro entre los años 1970 a 2011, dichas curvas de nivel representan a cada 5m el nivel de aguas en el Valle en ese periodo de tiempo, estos niveles muestran el abatimiento por décadas y están representados por mapas geográficos UTM. (Figuras 4.3.2, 4.3.3, 4.3.4, 4.3.5, 4.3.6 y 4.3.7).

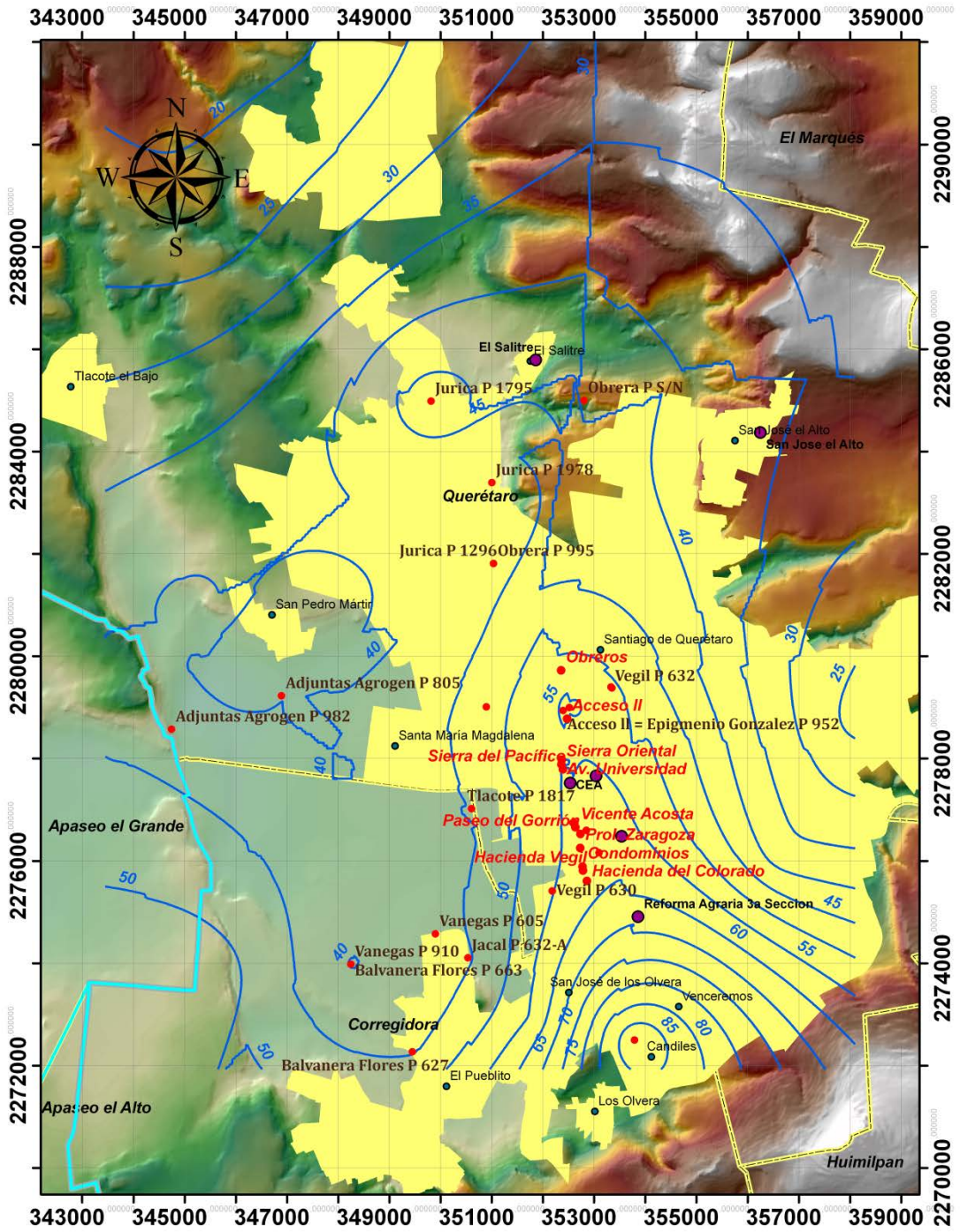


Figura 4.3.2 Curvas de Nivel del Abatimiento del agua en la Zona Urbana del Valle de Querétaro en el Año 1970.

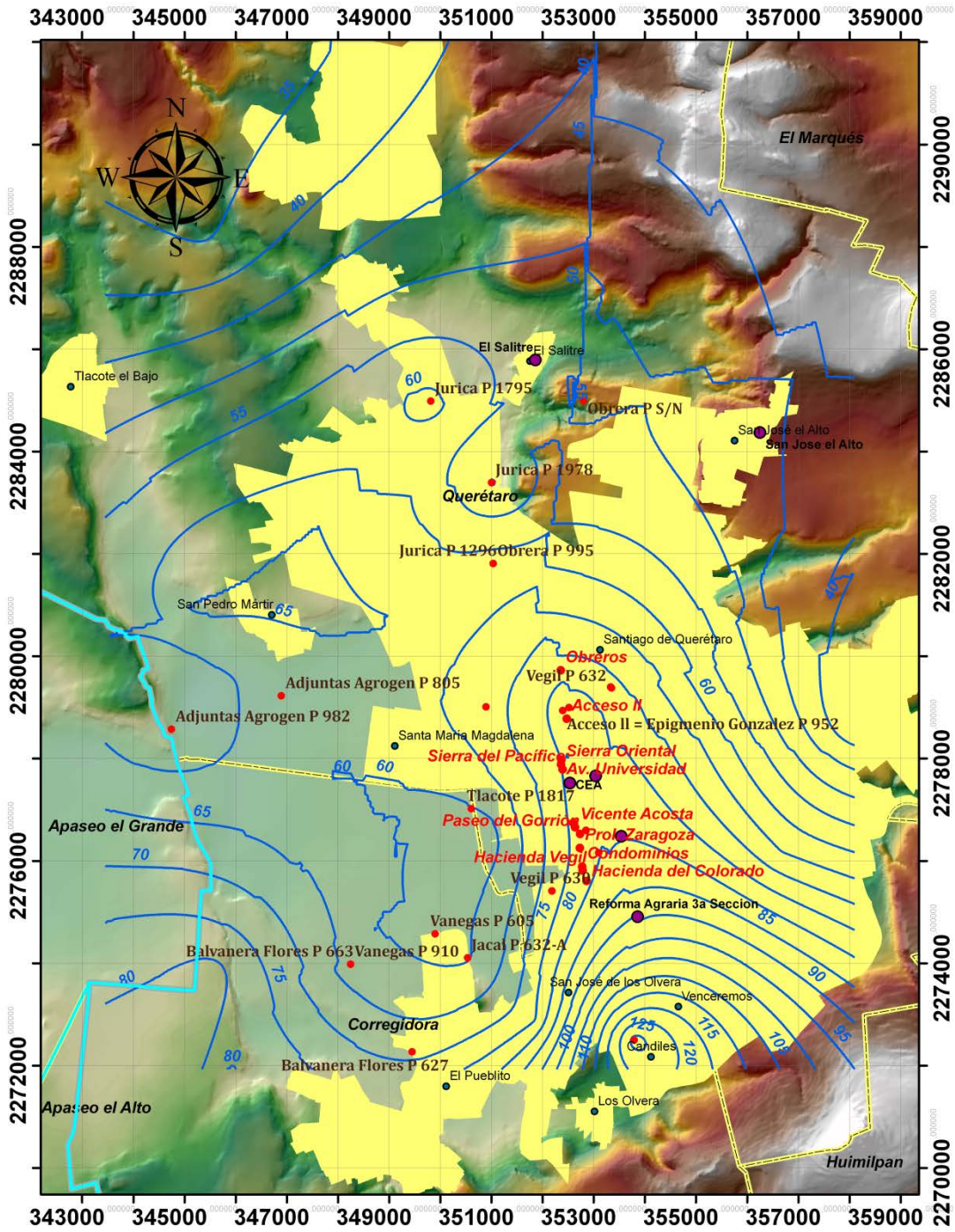


Figura 4.3.3 Curvas de Nivel del Abatimiento del agua en la Zona Urbana del Valle de Querétaro en el Año 1980

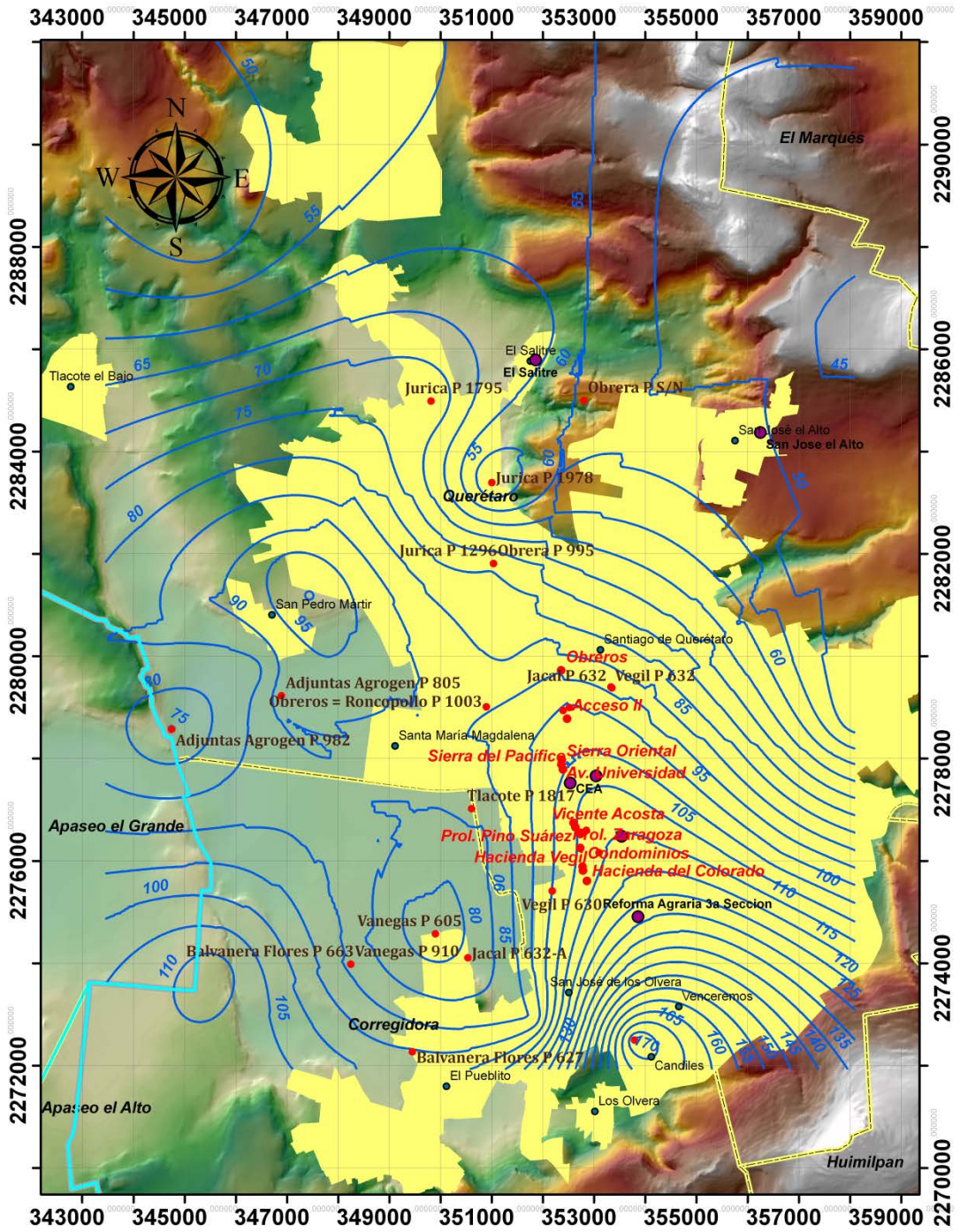


Figura 4.3.4 Curvas de Nivel del Abatimiento del agua en la Zona Urbana del Valle de Querétaro en el Año 1990

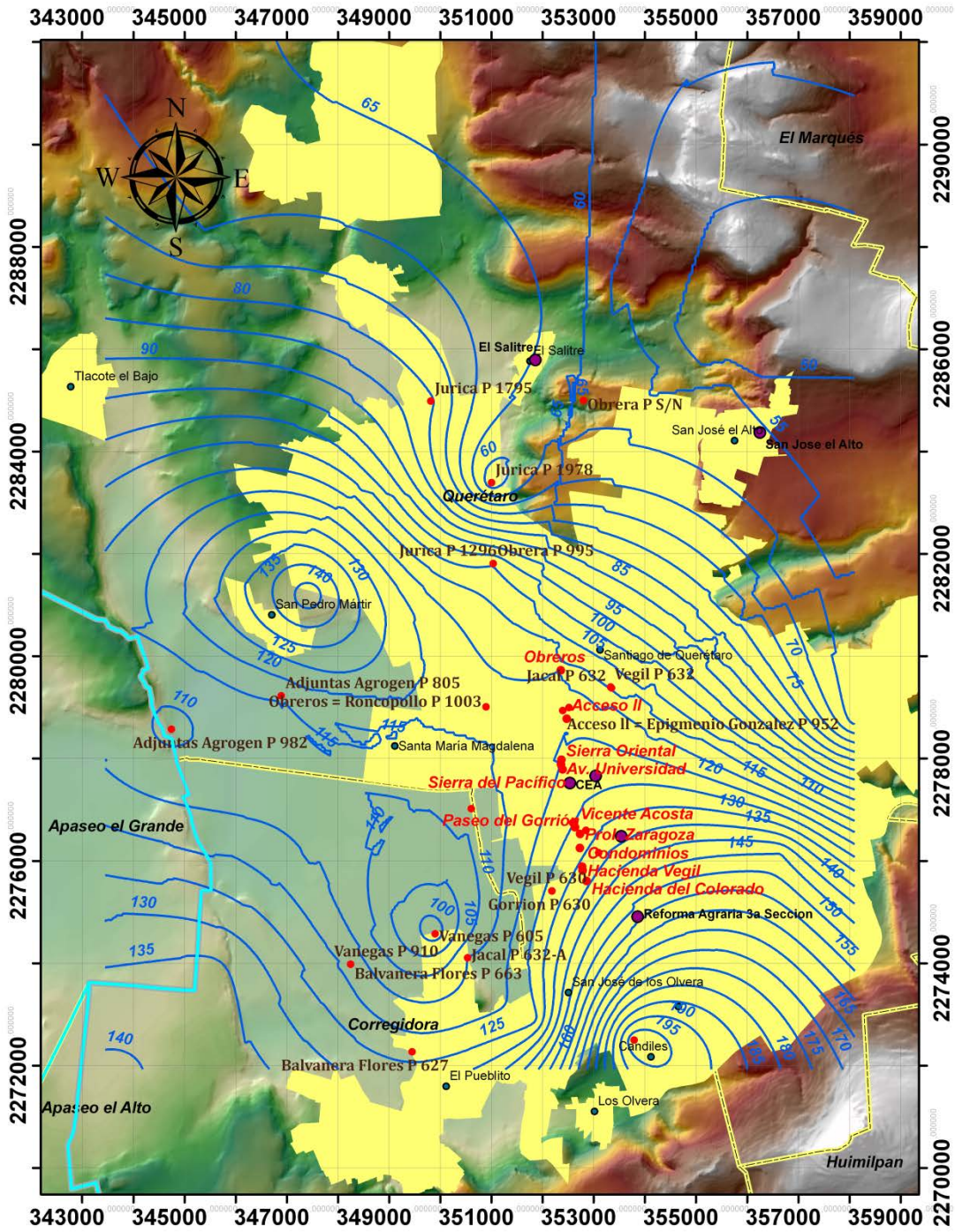


Figura 4.3.5 Curvas de Nivel del Abatimiento del agua en la Zona Urbana del Valle de Querétaro en el Año 2000

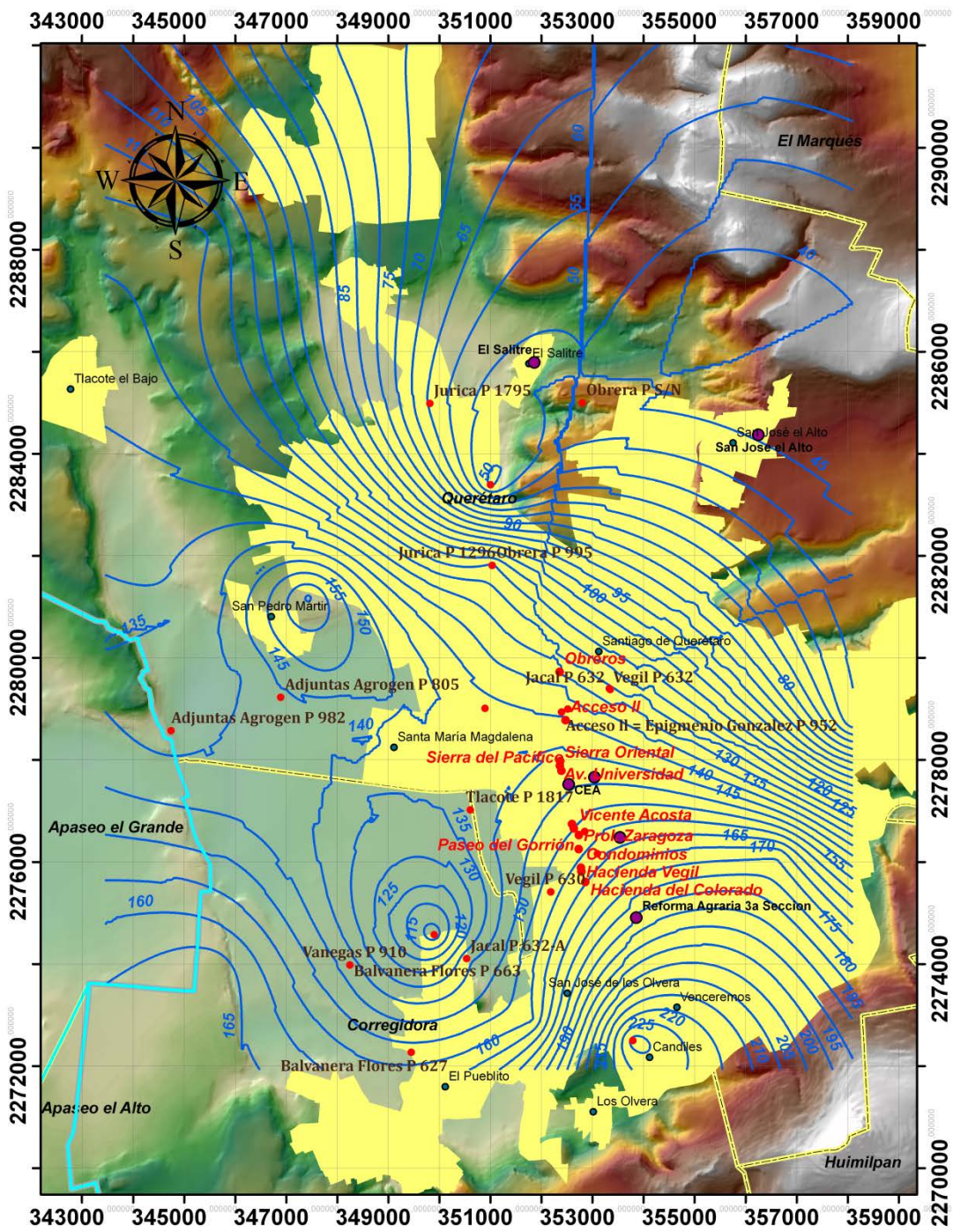


Figura 4.3.6 Curvas de Nivel del Abatimiento del agua en la Zona Urbana del Valle de Querétaro en el Año 2010

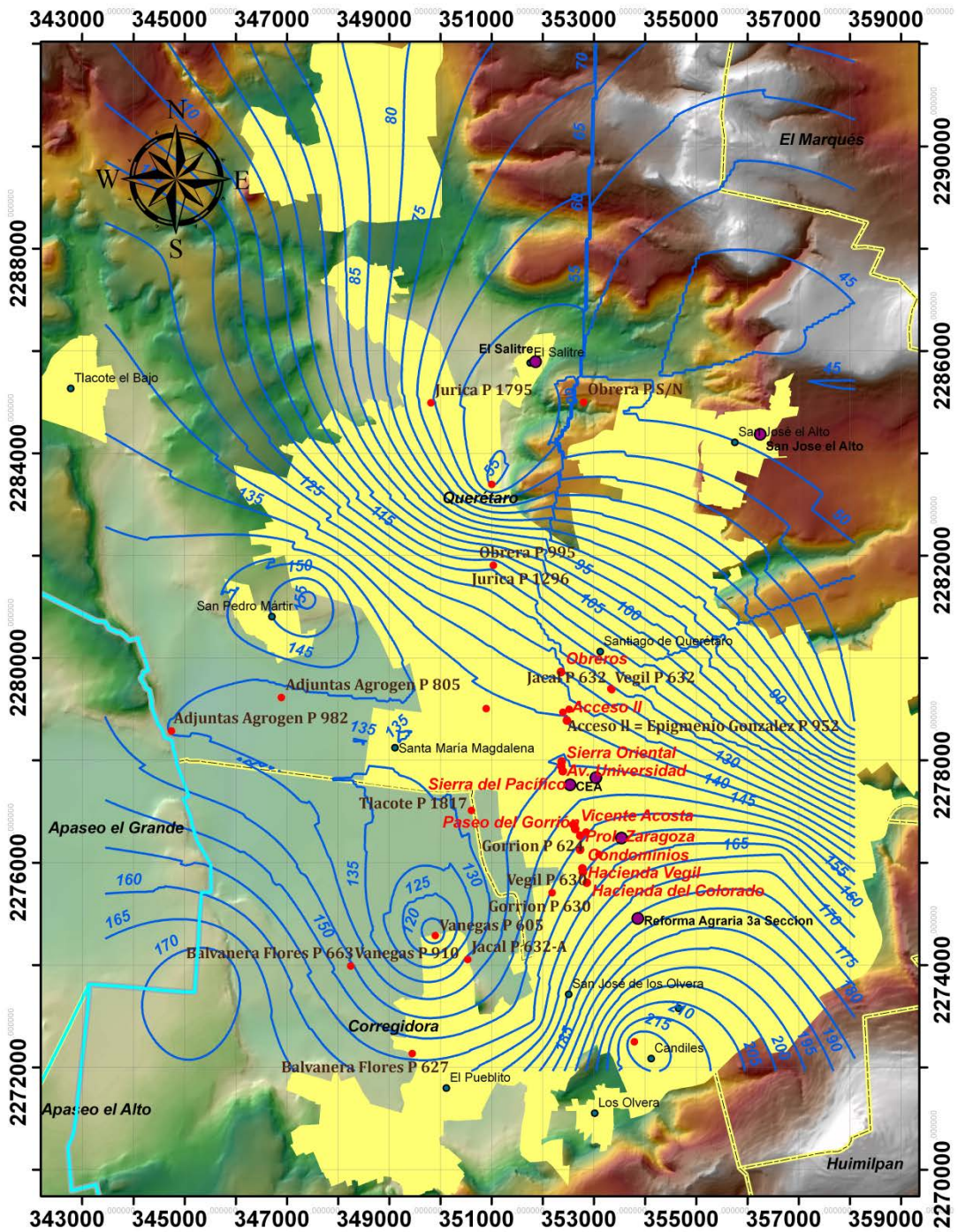


Figura 4.3.7 Curvas de Nivel del Abatimiento del agua en la Zona Urbana del Valle de Querétaro en el Año 2011

Mediante las curvas de nivel mostradas en las Figuras anteriores se obtuvieron datos de abatimiento de los pozos mostrados en la Figura 4.3.3, dichos valores se observan en la Tabla 4.3.3.

POZO	X	Y	1970	1980	1990	2000	2010	2011
<i>Tlacote P 1817</i>	350608.88	2277022.20	45.80	59.80	86.60	112.30	137.50	136.20
<i>Tlacote P 624</i>	352853.66	2276595.29	57.40	78.10	106.90	127.70	152.00	149.50
<i>Jacal P 632-A</i>	350536.00	2274107.00	56.80	75.90	103.00	132.00	157.50	155.00
<i>Jacal P 632</i>	353333.75	2279396.98	60.50	83.70	113.90	141.20	167.00	164.10
<i>Obrera P 995</i>	351038.00	2281812.00	47.80	67.20	83.10	110.00	123.00	124.00
<i>Obrera P 822</i>	352800.00	2285000.00	48.60	67.50	81.20	102.80	112.50	113.40
<i>Vanegas P 910</i>	348247.00	2273979.00	46.90	70.50	98.20	123.70	154.10	156.60
<i>Vanegas P 605</i>	349900.00	2274577.00	42.00	68.00	85.10	109.10	132.00	132.90
<i>Balvanera Flores P 656</i>	353795.00	2272498.00	50.10	78.90	109.00	135.20	165.60	170.10
<i>Balvanera Flores P 663</i>	348247.00	2273979.00	44.60	69.40	96.40	125.60	153.00	155.20
<i>Balvanera Flores P 627</i>	349450.00	2272271.00	46.20	60.00	81.30	111.00	135.50	134.30
<i>Jurica P 1296</i>	351038.00	2281812.00	43.00	53.00	57.10	67.10	60.10	63.70
<i>Jurica P 1978</i>	351004.00	2283393.00	47.00	60.40	72.30	79.40	64.20	66.00
<i>Jurica P 1795</i>	349818.00	2284988.00	37.90	52.00	66.00	78.20	81.20	83.10
<i>Adjuntas Agrogen P 982</i>	344744.00	2278574.00	43.20	57.10	77.00	110.00	138.80	141.00
<i>Adjuntas Agrogen P 805</i>	346893.00	2279228.00	42.00	68.00	85.10	109.10	132.00	132.90
<i>Zaragoza P 630</i>	352183.02	2275413.43	54.70	72.60	100.10	126.70	152.80	150.30
<i>Zaragoza P 980</i>	353098.78	2276160.90	58.10	79.70	109.00	132.50	157.40	154.80
<i>Gorrion P 630</i>	352183.02	2275413.43	54.70	72.60	100.10	126.70	152.80	150.30
<i>Gorrion P 624</i>	352853.66	2276595.29	57.40	78.10	106.90	127.70	152.00	149.50
<i>Vegil P 630</i>	352183.02	2275413.43	54.70	72.60	100.10	126.70	152.80	150.30
<i>Vegil P 632</i>	353333.75	2279396.98	60.50	83.70	113.90	141.20	167.00	164.10
<i>Obreros = Roncopollo P 1003</i>	350897.79	2279013.07	45.70	67.90	89.60	116.50	136.50	136.40
<i>Obreros = Roncopollo P 954</i>	353351.38	2279378.71	50.80	71.60	88.90	109.60	121.00	121.00
<i>Acceso II = Epigmenio Gonzalez P 952</i>	352395.45	2278937.62	55.00	77.00	95.30	118.80	134.10	134.50
<i>Acceso II = Epigmenio Gonzalez P 957</i>	352517.44	2278995.66	55.00	77.00	95.10	118.10	132.90	132.50

Tabla 4.3.3 Nivel de Abatimiento en los pozos analizados en esta investigación.

4.4 MÉTODO DE ASENTAMIENTOS POR ESFUERZOS EFECTIVOS (TERZAGHI, 1956).

El asentamiento en el Valle de Querétaro según este método debió empezar en el momento que se empezó a extraer el agua del subsuelo, pero se conocen los niveles de Abatimiento solamente del año 1970 a Diciembre de 2011, ésto quiere decir que el asentamiento dado antes de ese año no es estudiado en esta investigación de tesis. De esta forma en este Capítulo se

hizo un análisis de asentamientos relativos entre el periodo de tiempo 1970 a 2011.

Por otro lado se realizó una investigación donde se analizan los módulos elásticos estáticos de los materiales de la Geología del Valle de Querétaro, donde se obtuvieron resultados que el valor del modulo elástico denotado en la Tabla 2.4.3, dividido entre 3 es el valor real de módulo elástico estático del material para el caso del Valle de Querétaro, el cual se utilizó en el análisis de este método (Salazar, 2009).

Para el análisis de asentamiento por esfuerzos efectivos es importante conocer los perfiles estratigráficos del lugar, el nivel de abatimiento del agua, y el módulo elástico estático de cada estrato.

1 OBREROS

En este punto en particular se cuenta con un perfil estratigráfico que se encuentra entre 300 y 400m cercano al punto Obreros, llamado Roncopollo en el trabajo de investigación de Pacheco (2007). Dicho perfil se muestra en la Figura 4.4.1, en el cual se muestra en las fronteras los pozos por medio de los cuales se realizó un análisis de esfuerzos efectivos.

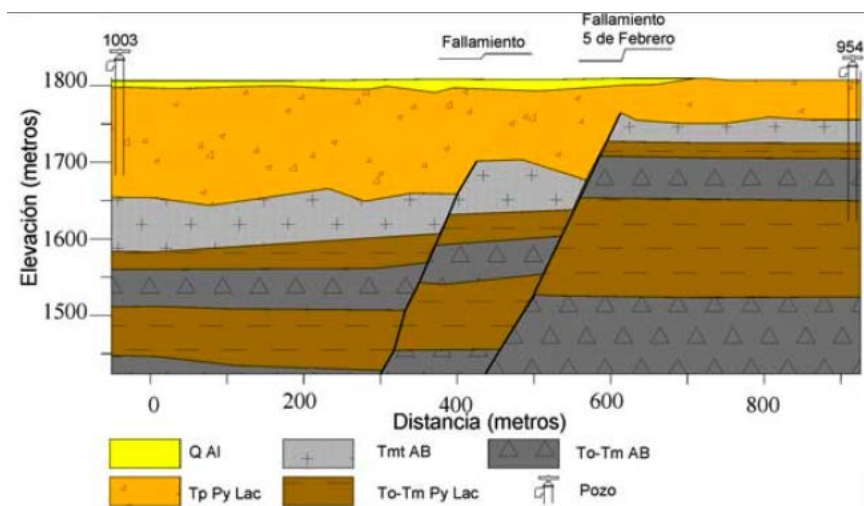


Figura 4.4.1 Perfil Roncopollo entre 300 y 400m de el punto Obreros de la Falla 5 de Febrero (Pacheco, 2007).

Se observa que los pozos en las fronteras de este punto en particular son 1003 y 964, para el cálculo de asentamientos por esfuerzos efectivos se realizó un análisis de cada pozo.

POZO 1003

Como se dijo anteriormente se analizaron los pozos en las fronteras del perfil estratigráfico de este punto Obreros, poniendo a escala y midiendo los espesores de cada estrato en Autocad 2011, se obtuvieron las medidas de los estratos y el nivel de abatimiento del agua en el periodo comprendido entre 1970 y 2011 (Figura 4.4.2).

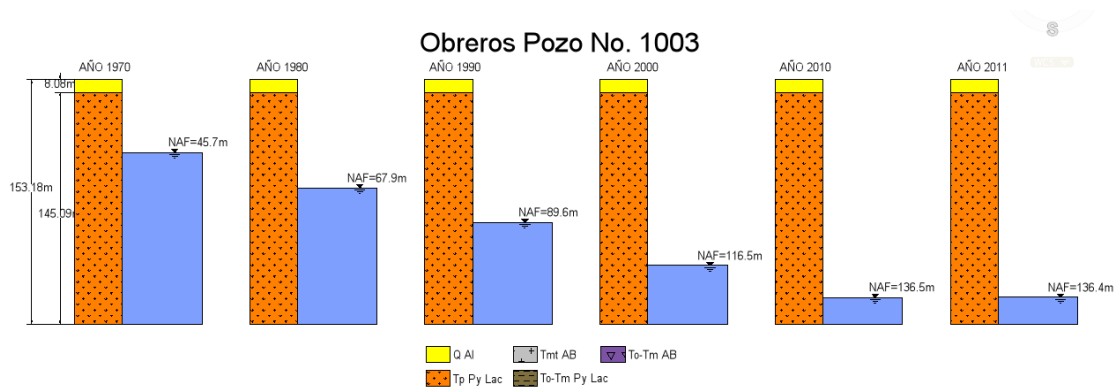


Figura 4.4.2 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 1003 del punto Roncopollo = Obreros.

Para el cálculo de asentamientos en este pozo es necesario contemplar la diferencia entre esfuerzos efectivos, entre cada periodo de tiempo, para esta investigación es por décadas (Tabla 4.4.1), y utilizando la ecuación 3.1.3 para el cálculo de asentamiento se tiene:

RONCOPOLLO = OBREROS, POZO 1003

POZO 1003	espesor (m)	espacum (cm)	AÑO abat	Abat (cm)	$\Delta\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q AI	8.08	808	1970	4570	0	0
TpPy Lac	145.09	15317	1980	6790	2.22	32.21176471
			1990	8960	2.17	30.77712418
			2000	11650	2.69	47.29477124
			2010	13650	2	26.14379085
			2011	13640	-0.01	-
						0.000653595

Tabla 4.4.1 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 1003 del punto Roncopollo = Obreros.

POZO 954

De la misma manera conforme al perfil estratigráfico del punto Roncopollo = Obreros, se obtuvieron las medidas de cada estrato el pozo 954, así como el nivel de abatimiento del agua en periodo de tiempo en décadas (Figura 4.4.3).

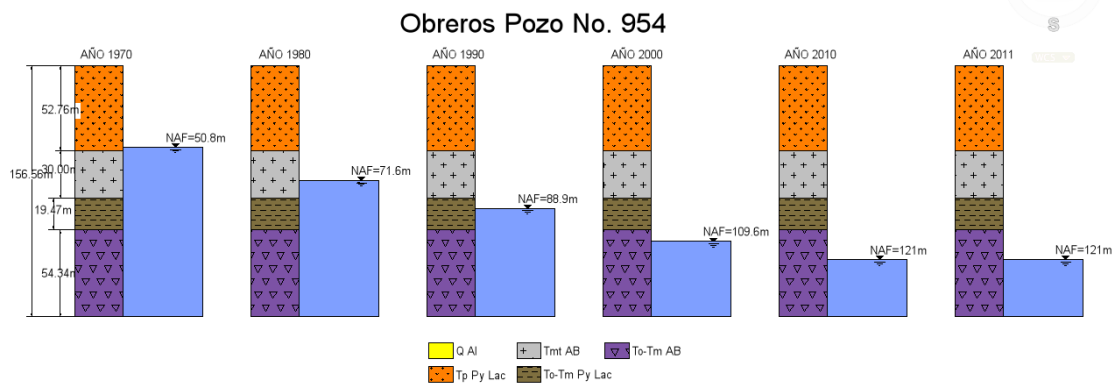


Figura 4.4.3 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 954 del punto Roncopollo = Obreros.

De la misma manera se obtiene el asentamiento utilizando la ecuación 4.1.4, para el pozo 954 (Tabla4.4.2).

RONCOPOLLO = OBREROS, POZO 954						
POZO 954	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO Abat	Abat (cm)	$\Delta\sigma(kg / cm^2)$	$\Delta H(cm)$
TpPy Lac	52.76	5276	1970	5080	0	0
Tmt AB	30	8276	1980	7160	2.08	2.676331323
To-Tm Py Lac	19.47	10223	1990	8890	1.73	0.0089787
To-Tm AB	54.34	15657	2000	10960	2.07	2.29666293
			2010	12100	1.14	1.9494
			2011	12100	0	0
TOTAL						6.931372953

Tabla 4.4.2 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 954 del punto Roncopollo = Obreros.

El asentamiento relativo en el punto Roncopollo = Obreros es la diferencia entre los asentamientos de los pozos 1003 y 954, a esto se le llama escalón de falla (ecuación 4.4.1).

$$\Delta H_{\text{OBREROS}} = 136.42 - 6.9313 = 129.5\text{cm} \quad 4.4.1$$

2. ACCESO II

Al igual que en el punto Obreros, el punto Acceso II corresponde al perfil estratigráfico del punto Epigmenio González del trabajo de investigación de Pacheco (2007), ya que se encuentra ubicado entre 300 y 400m del punto Acceso II (Figura 4.4.4).

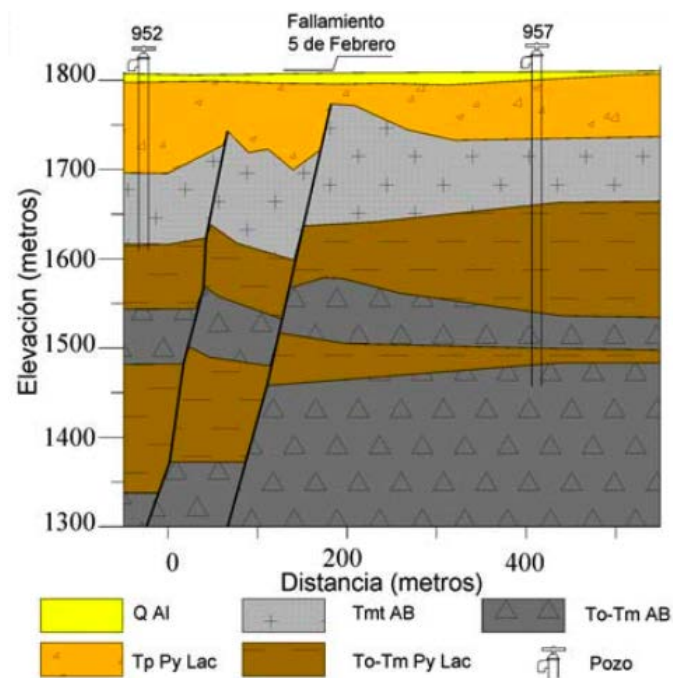


Figura 4.4.4 Perfil Epigmenio González entre 300 y 400m de el punto Acceso II de la Falla 5 de Febrero (Pacheco, 2007).

De igual manera se realizó el cálculo de asentamientos por esfuerzos efectivos en las fronteras de dicho perfil en los Pozos denotados 952 y 957.

POZO 952

Poniendo a escala y midiendo los estratos del perfil en Autocad 2011, del punto Acceso II (Figura 4.4.5).

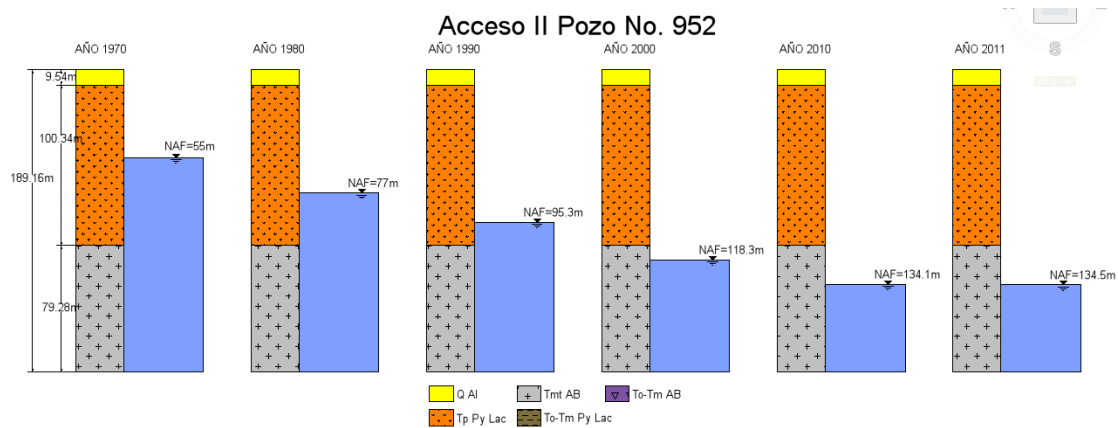


Figura 4.4.5 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 952 del punto Epigmenio González = Acceso II.

Con la diferencia de nivel de abatimiento del agua se obtuvo el diferencial de esfuerzos efectivos por década (Tabla 4.4.3).

EPIGMENIO GONZALEZ = ACCESO II, POZO 952

POZO 952	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO Abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q AI	9.54	954	1970	5500	0	0
TpPy Lac	100.34	10988	1980	7700	2.2	31.63398693
Tmt AB	79.28	18916	1990	9530	1.83	21.88823529
			2000	11880	2.35	22.40040625
			2010	13410	1.53	0.0070227
			2011	13450	0.04	0.0000048
TOTAL						75.92965597

Tabla 4.4.3 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 952 del punto Epigmenio González = Acceso II.

POZO 957

De al misma manera se obtuvieron las medidas del perfil estratigráfico del punto Epigmenio González y el nivel de abatimiento para el Pozo 957 del punto Acceso II de este trabajo de tesis (Figura 4.4.6).

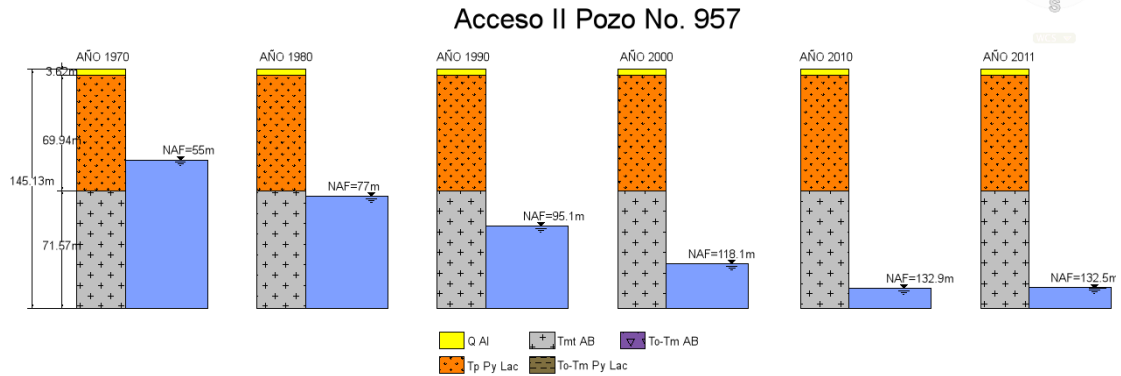


Figura 4.4.6 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 957 del punto Epigmenio González = Acceso II.

Para el cálculo del asentamiento en el Pozo 957 es necesario tomar en cuenta el nivel de abatimiento del agua (Tabla 4.4.4).

EPIGMENIO GONZALEZ = ACCESO II, POZO 957						
POZO 957	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO Abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg / cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q AI	3.62	362	1970	5500	0	0
TpPy Lac	69.94	7356	1980	7700	2.2	26.6898521
Tmt AB	71.57	14513	1990	9510	1.81	0.0098283
			2000	11810	2.3	0.01587
			2010	13290	1.48	0.0065712
			2011	13250	-0.04	-0.0000048
			TOTAL			26.7221168

Tabla 4.4.5 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 957 del punto Epigmenio González = Acceso II.

El asentamiento relativo, o escalón de falla es la diferencia entre el asentamiento de los Pozos 952 y 957 del punto Epigmenio González = Acceso II (ecuación 4.4.2).

$$\Delta H_{ACCESOI} = 75.9296 - 26.7221 = 49.2cm \quad 4.4.2$$

3. GORRION

En este punto se cuenta con el perfil estratigráfico obtenido del trabajo de investigación de Pacheco (2007), esto quiere decir que en este punto, que se analizó en ese trabajo de investigación, corresponde exactamente al punto de tomado de la tesis de Pacheco (2007) (Figura 4.4.7).

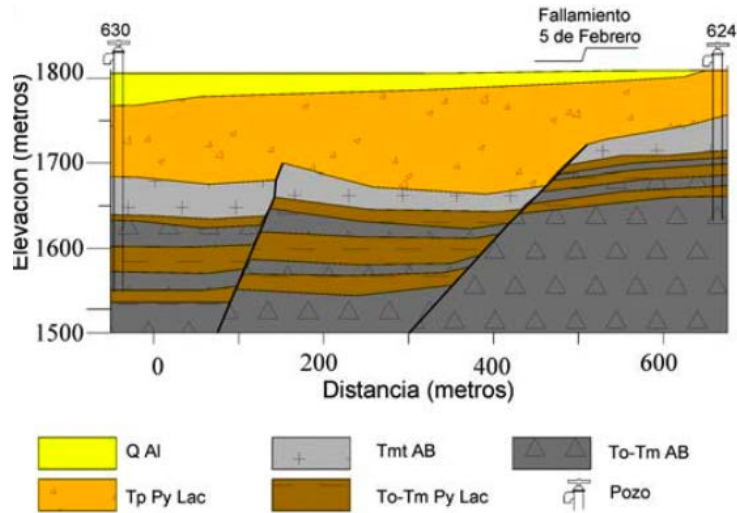


Figura 4.4.7 Perfil Paseo del Gorrión, del punto Gorrión de la Falla 5 de Febrero (Pacheco, 2007).

El calculo de asentamientos relativos en el punto Gorrión, es la diferencia entre el asentamiento del pozo 630 y 624.

POZO 630

De igual manera se acoto este perfil estratigráfico en Autocad 2011, y se obtuvieron medidas de cada estrato de los Pozos en las fronteras de este punto así como el nivel de abatimiento del agua (Figura 4.4.8).

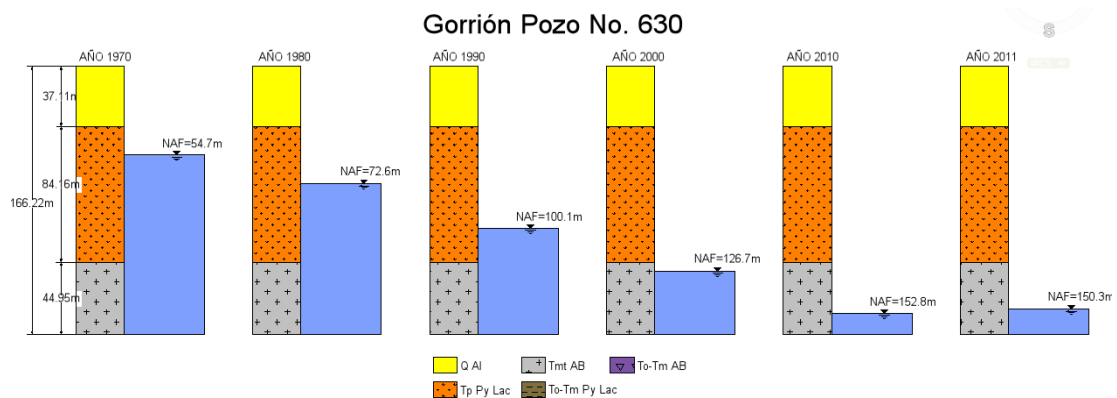


Figura 4.4.8 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 630 del punto Paseo del Gorrión.

El cálculo de asentamiento tomando en cuenta el nivel de abatimiento del agua en década para el Pozo 630 del punto Gorrión (Tabla 4.4.5).

PASEO DEL GORRIÓN, POZO 630

POZO 630	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO Abat	Abat (cm)	$\Delta\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q Al	37.11	3711	1970	5470	0	0
TpPy Lac	84.16	12127	1980	7260	1.79	20.94183007
Tmt AB	44.95	16622	1990	10010	2.75	49.42810458
		17302	2000	12670	2.66	36.80969262
		20386	2010	15280	2.61	0.0204363
			2011	15030	-0.25	-0.0001875
TOTAL						107.1998761

Tabla 4.4.5 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 630 del punto Paseo del Gorrión.

POZO 624

Igualmente, se obtuvieron el nivel de abatimiento del agua y las medidas de los estratos del Pozo 624 (Figura 4.4.9).

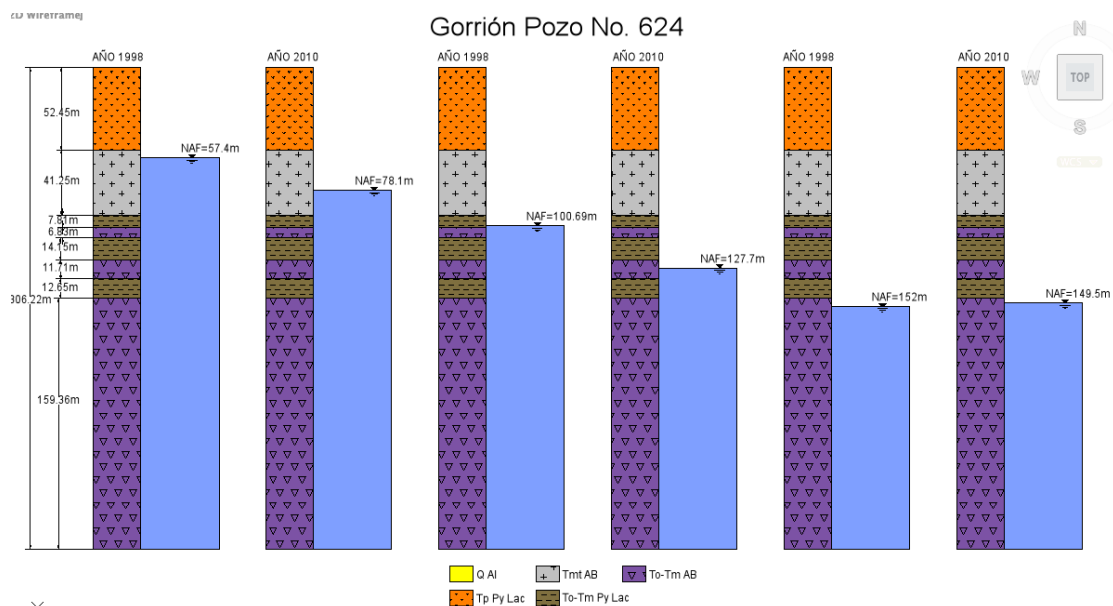


Figura 4.4.9 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 624 del punto Paseo del Gorrión.

Para el cálculo de asentamiento en el Pozo 624, se tomo en cuenta el nivel de abatimiento del agua en décadas así como la diferencia de esfuerzos efectivos. (Tabla 4.4.6).

PASEO DEL GORRIÓN, POZO 624

POZO 624	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta H(cm)$
TpPy Lac	52.16	5216	1970	5740	0	0
Tmt AB	41.25	9341	1980	7810	2.07	0.0128547
To-Tm Py Lac	7.81	10122	1990	10690	2.88	5.84090784
To-Tm AB	6.83	10805	2000	12770	2.08	2.65033392
To-Tm Py Lac	14.15	12220	2010	15200	2.43	4.61941785
To-Tm AB	11.71	13391	2011	14950	-0.25	-0.0000625
To-Tm Py Lac	12.65	14656			TOTAL	13.12345181
To-Tm AB	159.68	30624				

Tabla 4.4.6 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 624 del punto Paseo del Gorrión.

El asentamiento relativo, o escalón de falla es la diferencia entre el asentamiento de los Pozos 630 y 624 del punto Paseo del Gorrión (ecuación 4.4.3).

$$\Delta H_{GORRIÓN} = 107.998 - 13.1234 = 94.87\text{cm} \quad 4.4.3$$

4. PROLONGACIÓN ZARAGOZA

Se tiene el perfil estratigráfico de este punto, del trabajo de Pacheco (2007), mostrado en la Figura 4.4.10.

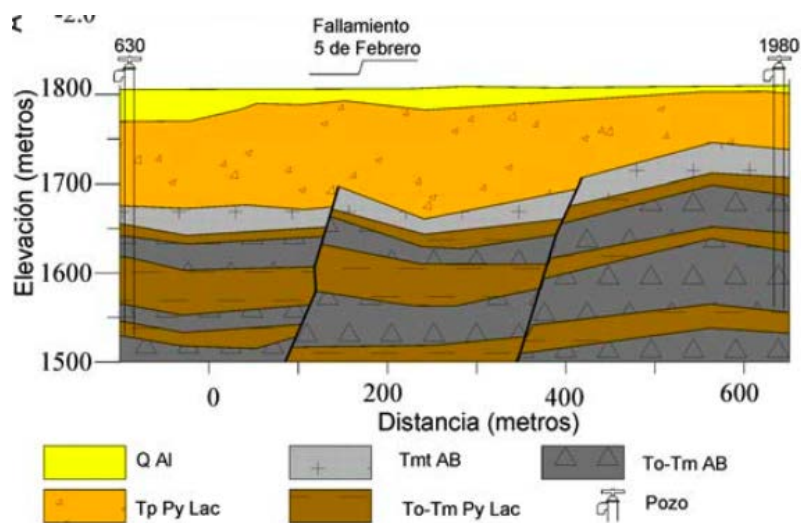


Figura 4.4.10 Prolongación Zaragoza, del punto Zaragoza de la Falla 5 de Febrero (Pacheco, 2007).

El asentamiento relativo en la falla 5 de Febrero es la diferencia de asentamientos entre los Pozos 630 y 1980.

POZO 630

Se escaló el perfil estratigráfico del Pozo 630 del punto Zaragoza y se obtuvieron las medidas de cada estrato así como su evolución del nivel de abatimiento del agua (Figura 4.4.11).

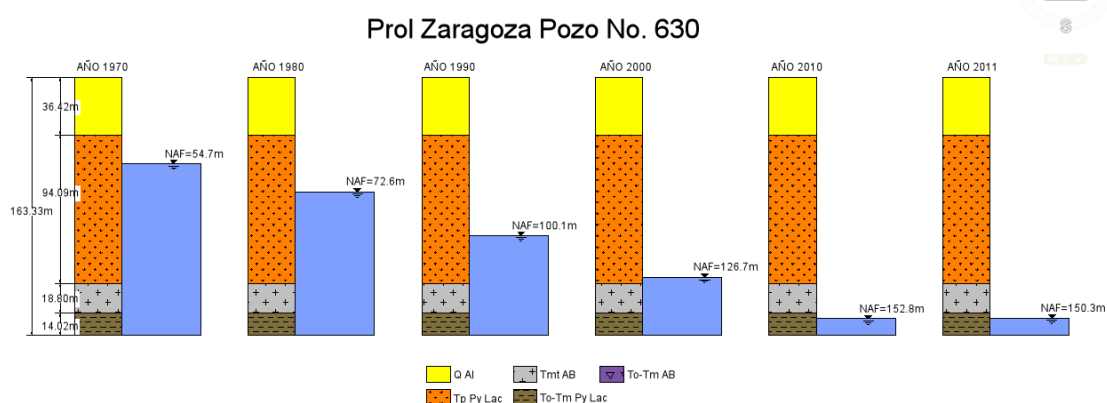


Figura 4.4.11 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 630 del punto Prolongación Zaragoza.

Se puede calcular el asentamiento en este Pozo, mediante la diferencia de esfuerzos efectivos por décadas (Tabla 4.4.7).

PROLONGACION ZARAGOZA, POZO 630						
POZO 630	Espesor (m)	Espacum (cm)	AÑO Abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q AI	36.42	3642	1970	5470	0	0
TpPy Lac	94.09	13051	1980	7260	1.79	20.94183007
Tmt AB	18.8	14931	1990	10010	2.75	49.42810458
To-Tm Py Lac	14.02	16333	2000	12670	2.66	46.24575163
			2010	15280	2.61	7.880467165
			2011	15030	-0.25	-0.09375
			TOTAL			124.4024034

Tabla 4.4.7 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 630 del punto Prolongación Zaragoza.

POZO 980

De la misma manera que con el Pozo 630, se escaló, y se sacaron las medidas de los estratos del pozo 980 del punto Obreros (Figura 4.4.12).

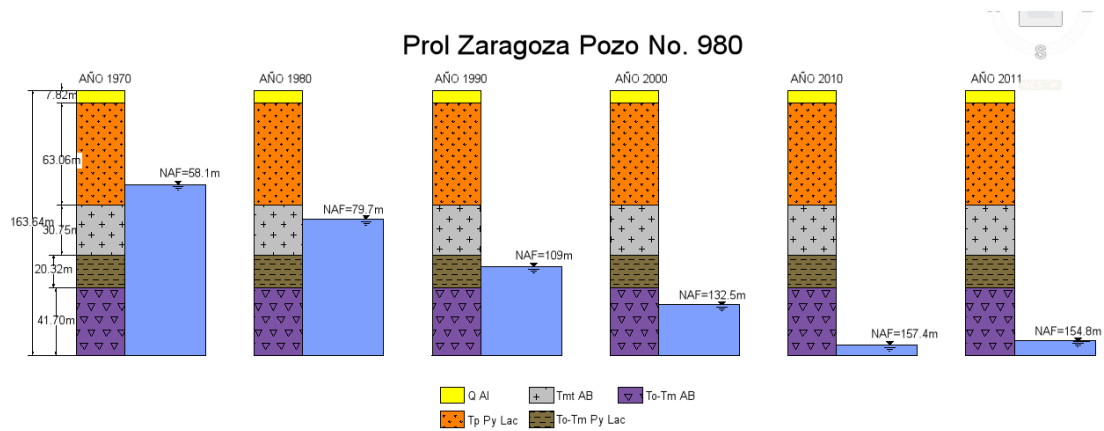


Figura 4.4.12 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 980 del punto Prolongación Zaragoza.

De esta manera es posible calcular el asentamiento en el Pozo 980, mediante la diferencia de esfuerzos efectivos por décadas (Tabla 4.4.8).

PROLONGACION ZARAGOZA, POZO 980						
POZO 980	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg / cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q AI	7.82	782	1970	5810	0	0
TpPy Lac	63.06	7088	1980	7970	2.16	18.0480683
Tmt AB	30.75	10163	1990	10900	2.93	3.25839147
To-Tm Py Lac	20.32	12195	2000	13250	2.35	4.57231275
To-Tm AB	41.7	16365	2010	15740	2.49	0.0186003
			2011	15480	-0.26	-0.0002028
TOTAL						25.89717002

Tabla 4.4.8 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 980 del punto Prolongación Zaragoza.

El asentamiento relativo en la Falla 5 de Febrero, en el Punto Zaragoza, es la diferencia entre los asentamientos de los Pozos 630 y 980 (ecuación 4.4.4).

$$\Delta H_{ZARAGOZA} = 124.02 - 25.897 = 98.12cm \quad 4.4.4$$

5. HACIENDA DEL VEGIL

Se cuenta con el perfil estratigráfico de este punto (Figura 4.4.13), obtenido del trabajo de investigación de Pacheco (2007).

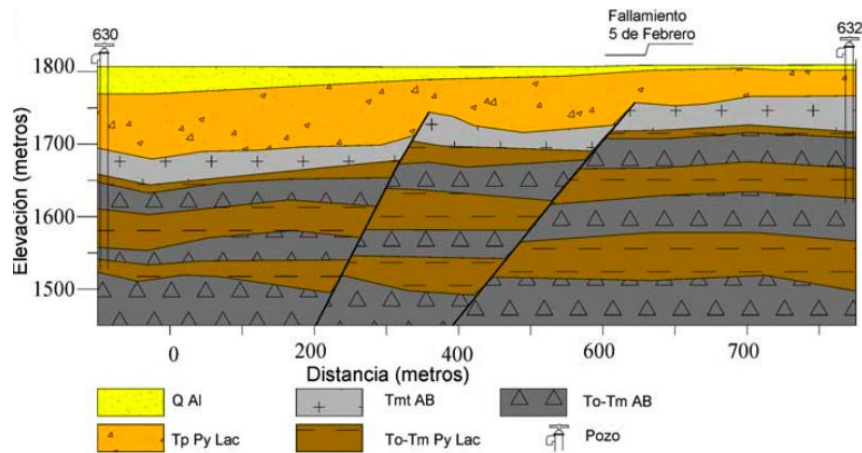


Figura 4.4.13 Hacienda del Vegil, del punto Vegil de la Falla 5 de Febrero (Pacheco, 2007).

El asentamiento relativo para la Falla 5 de Febrero es la diferencia entre los asentamientos de los Pozos 630 y 632.

POZO 630

Se escaló la Figura 4.4.13 en Autocad 2011, y se obtuvieron las medidas de los espesores de los estratos, así como el nivel de abatimiento del agua en el Pozo 630 del punto Vegil (Figura 4.4.14).

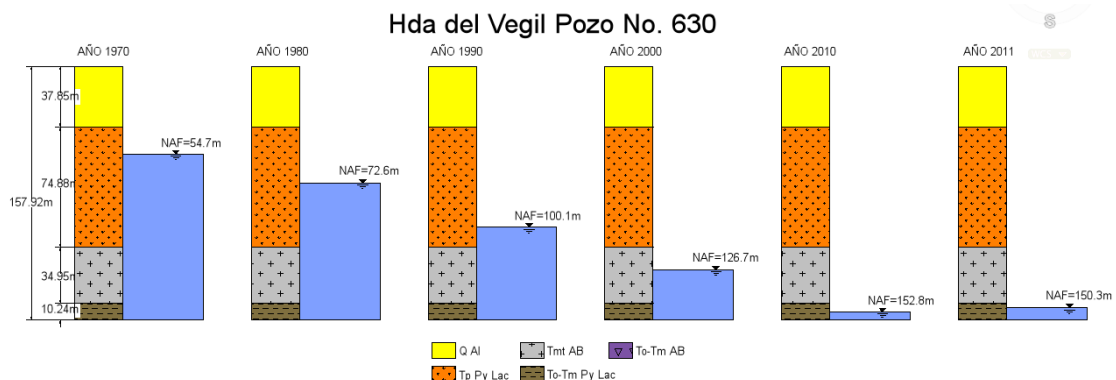


Figura 4.4.14 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 630 del punto Hacienda del Vegil.

El asentamiento en el pozo 630, se obtuvo mediante esfuerzos efectivos debidos al nivel de abatimiento del agua en décadas (Tabla 4.4.9).

HACIENDA DEL VEGIL, POZO 630						
POZO 630	Espesor (m)	EspAcum (m)	AÑO Abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg/cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q Al	37.85	37.85	1970	54.7	0	0
TpPy Lac	74.88	112.73	1980	72.6	1.79	20.94183007
Tmt AB	34.95	147.68	1990	100.1	2.75	49.42810458
To-Tm Py Lac	10.24	157.92	2000	126	2.59	43.84379085
			2010	152.8	2.68	-23.21196673
			2011	150.3	-0.25	0.0001875
					TOTAL	91.00194626

Tabla 4.4.9 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 630 del punto Hacienda del Vegil.

POZO 632

De la misma manera se acotaron los estratos del punto Vegil, y se obtuvieron los espesores de cada estrato en cuestion, asi como el nivel de abatimiento del agua para el Pozo 632 (Figura 4.4.15).

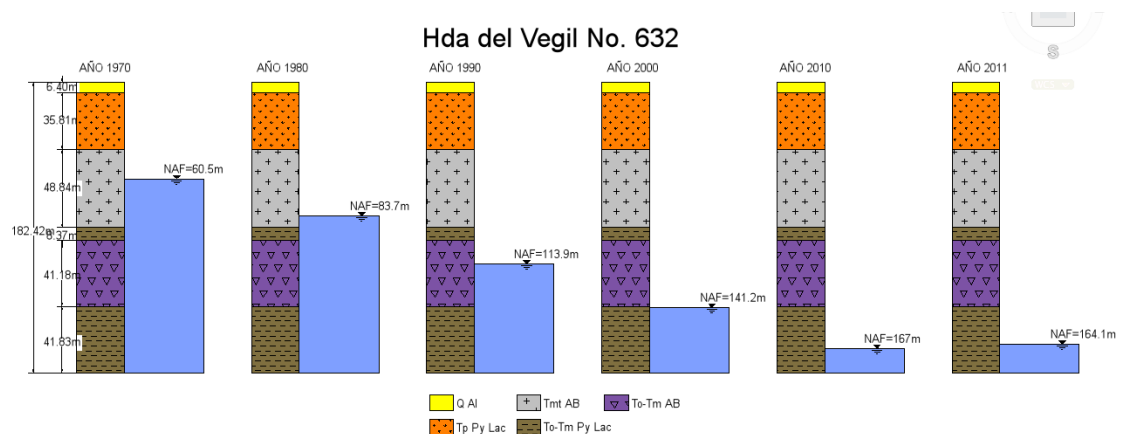


Figura 4.4.15 Nivel de Abatimiento del agua y perfil estratigráfico (m) del Pozo 632 del punto Hacienda del Vegil.

El asentamiento en este Pozo, mediante esfuerzos efectivos por décadas (Tabla 4.4.10).

HACIENDA DEL VEGIL, POZO 632

POZO 632	Espesor (m)	EspAcum (cm)	AÑO abat	Abat (m)	$\Delta\sigma(kg / cm^2)$	$\Delta H(cm)$
Q AI	6.4	640	1970	60.5	0	0
TpPy Lac	35.81	4221	1980	83.7	2.32	0.0161472
Tmt AB	48.84	9105	1990	113.9	3.02	3.81138798
To-Tm Py Lac	8.37	9942	2000	141.2	2.73	0.2675673
To-Tm AB	41.18	14060	2010	167	2.58	9.9846
To-Tm Py Lac	41.83	18243	2011	164.1	-0.29	-0.12615
TOTAL						13.95355248

Tabla 4.4.10 Diferencia de esfuerzos efectivos y asentamiento (cm) en décadas del Pozo 632 del punto Hacienda del Vegil.

El asentamiento relativo para la Falla 5 de Febrero se obtuvo mediante la diferencia de asentamientos de los Pozos 630 y 632 del punto Hacienda del Vegil (ecuación 4.4.5).

$$\Delta H_{VEGIL} = 91.002 - 13.95 = 76.052cm \quad 4.4.5$$

Se tienen los diferenciales verticales de todos los puntos mostrados en la Figura 4.3.1, dichos diferenciales verticales se calcularon de la misma forma como los 5 anteriores puntos (Tabla 4.4.11).

<i>DIFERENCIAL VERTICAL, Querétaro, Qro.</i>	
<i>Punto</i>	<i>Diferencial (cm)</i>
<i>Tlacote</i>	72.57
<i>Jacal</i>	36.96
<i>Obrera</i>	98.97
<i>Vanegas</i>	18.75
<i>Balvanera Flores</i>	52.80
<i>Jurica</i>	21.78
<i>Ajuntas Agrogen</i>	112.19
<i>Paseo del Gorrión</i>	94.08
<i>Prolongación Zaragoza</i>	98.51
<i>Hacienda del Vegil</i>	77.05
<i>Roncopollo = Obreros</i>	129.50
<i>Epigmenio González = Acceso II</i>	49.21

Tabla 4.4.11 Diferencial Vertical en la zona Urbana del Valle de Querétaro.

4.5 ASENTAMIENTOS PARA SUELOS NO SATURADOS VARIANTE DE PACHECO (2007).

En este Capítulo es importante mencionar que en el análisis de asentamientos los módulos elásticos estáticos del material se dejan tal y como están (Tabla 2.4.3), esto es porque son los módulos que utilizó Pacheco (2007), aunque se corrigieron ecuaciones importantes, la ecuación 3.2.8, es la misma utilizada por Pacheco para suelos no saturados.

El resultado es el asentamiento por este método es único y es aplicable para suelo no saturado, en la Figura 4.5.1 se muestran como se presenta el asentamiento.

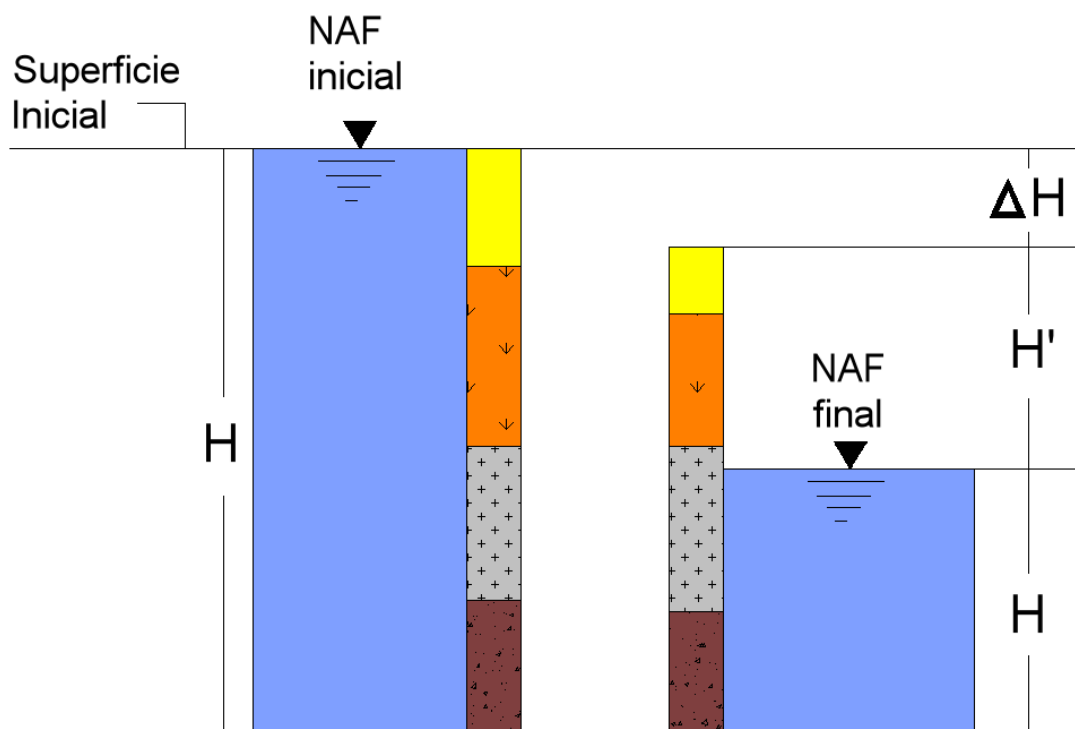


Figura 4.5.1 Asentamiento en la masa de suelo utilizando la ecuación general de asentamiento.

De esta forma, y utilizando la ecuación 3.2.8 para el cálculo de asentamientos es posible al igual que en el Capítulo 3.4 obtener el asentamiento relativo, o diferencial vertical para los puntos de esta investigación usando los mismos perfiles.

Cabe mencionar que solo se conoce la humedad (ω), el peso específico de sólidos (γ_s), y el peso específico sumergido de sólidos (γ'_s), de los dos primeros estratos de suelo (Q Al y TpPy Lac), que se analizaron en este trabajo

de tesis, pero que de la misma manera son los estratos mas significativos en cuanto asentamiento, debido a sus módulos elásticos estáticos mas bajos.

Bajo las condiciones de este método, es de manera necesaria tomar en cuenta el nivel de abatimiento del agua, además se calculó el asentamiento relativo (cm) entre los puntos analizados entre los años 1970, hasta el año 2011.

1. OBREROS.

Para este punto, se utilizo el perfil estratigráfico del punto Roncopollo (Figura 4.4.1), que se encuentra entre 300 y 400m del punto Obreros, dicho perfil se acotó en Autocad 2011 y se obtuvo el espesor de cada uno de los estratos que lo comprenden, así como el nivel de abatimiento del agua de los años 1970 y 2011 (Figura 4.5.1).

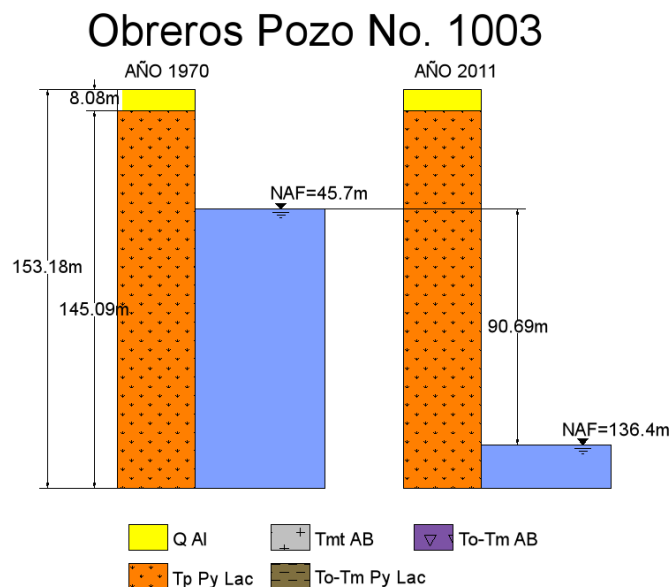


Figura 4.5.1 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Roncopollo = Obreros en el Pozo 1003.

El asentamiento en este pozo se obtuvo mediante la ecuación 3.2.8, y se aplico en este caso únicamente en el estrato TpPy Lac, para la diferencia entre Niveles de Agua en el periodo de tiempo 1970 a 2011 (Tabla 4.5.1).

Estrato	$\omega(\%)$	ν_s (kg/cm ³)	ν_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	9069	175.7822931

Tabla 4.5.1 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Roncopollo = Obreros del Pozo 1003.

Para el Pozo 954, del punto Obreros se obtuvo de igual manera el perfil estratigráfico con los espesores y el nivel de abatimiento para el mismo periodo de tiempo (Figura 4.5.2).



Figura 4.5.2 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Roncopollo = Obreros en el Pozo 954.

Obtenidos los parámetros de espesor y abatimiento del agua se calculó el asentamiento del Pozo 954 (Tabla 4.5.2).

Roncopollo = Obreros POZO 954						
Estrato	$\omega(\%)$	ν_s (kg/cm ³)	ν_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.002471	0.001471	459	196	0.080107403

Tabla 4.5.2 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Roncopollo = Obreros del Pozo 954.

El asentamiento relativo en el punto Obreros en la Falla 5 de Febrero, se calcula por medio de la diferencia de asentamientos (ecuación 4.5.1).

$$\Delta H_{OBREROS} = 175.78 - 0.0810 = 175.7 \text{ cm} \quad 4.5.1$$

2. ACCESO II

Para este punto tampoco se cuenta con el perfil estratigráfico, pero se tomo en cuenta el perfil del punto Epigmenio Gonzalez (Figura 4.4.4), presentado en el trabajo de Pacheco (2007), dicho perfil se acotó de la misma manera y se obtuvieron los espesores de los estratos y el nivel de abatimiento del agua en el periodo de tiempo analizado (Figura 4.5.3).

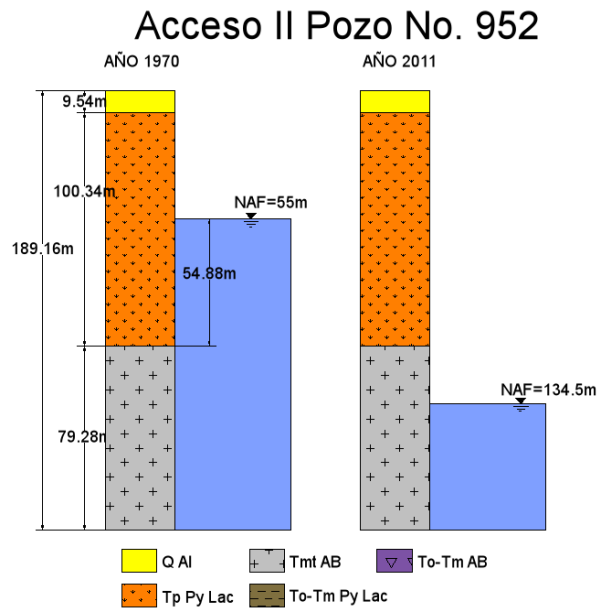


Figura 4.5.3 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Epigmenio Gonzalez = Acceso II en el Pozo 952.

El asentamiento ocurre en el estrato TpPy Lac, que es donde se tiene información de sus parámetros (Tabla 4.5.3).

Epigmenio Gonzalez = Acceso II POZO 952

Estrato	$\omega(\%)$	γ_s (kg/cm ³)	γ_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	5488	64.3701509

Tabla 4.5.3 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Epigmenio González = Acceso II del Pozo 952.

Este punto comprende en sus fronteras también el Pozo 957, del cual se obtuvieron los espesores de cada estrato así como el nivel de abatimiento del agua en el mismo periodo de tiempo (Figura 4.5.4).

Acceso II Pozo No. 957

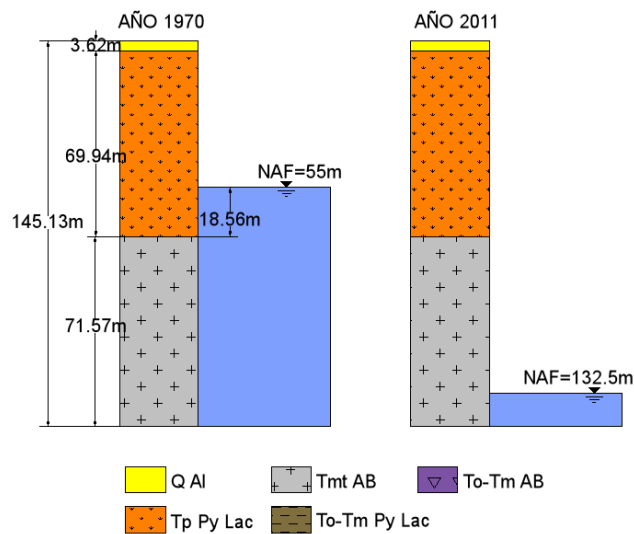


Figura 4.5.4 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Epigmenio Gonzalez = Acceso II en el Pozo 957.

Se observa en la figura anterior que el estrato de influencia es el TpPy Lac del cual se calculó el asentamiento (Tabla 4.5.4).

Acceso II POZO 957						
Estrato	ω (%)	γ_s (kg/cm ³)	γ_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	1856	7.362278902

Tabla 4.5.4 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Epigmenio González = Acceso II del Pozo 957.

El asentamiento relativo para el punto Acceso II es la diferencia de los asentamientos de los Pozos 952 y 957 (ecuación 4.5.2).

$$\Delta H_{ACCESOII} = 64.37 - 7.362 = 57.01 \text{ cm} \quad 4.5.2$$

3. PASEO DEL GORRION

En este punto sí se cuenta con el perfil estratigráfico (Figura 4.4.7), obtenido de Pacheco (2007). Se acotó en Autocad 2011 y se obtuvieron los espesores de los estratos y el nivel de abatimiento del agua en el periodo analizado, para el Pozo 630 (Figura 4.5.5).

Gorrion Pozo No. 630

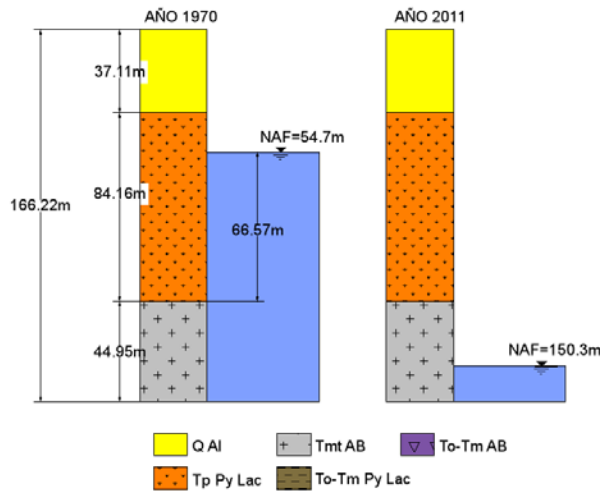


Figura 4.5.5 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Paseo del Gorrion en el Pozo 630.

Se calculó el asentamiento por medio de la ecuación 4.2.8, aplicada en el estrato TpPy Lac, donde tiene influencia (Tabla 4.5.5).

Paseo del Gorrion POZO 630

Estrato	$\omega(\%)$	γ_s (kg/cm ³)	γ_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	6657	94.71383806

Tabla 4.5.5 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Paseo del Gorrion del Pozo 630.

De la misma forma se obtuvieron los parámetros estratigráficos del Pozo 624, así como el nivel de abatimiento del agua en el mismo periodo de tiempo (Figura 4.5.6).

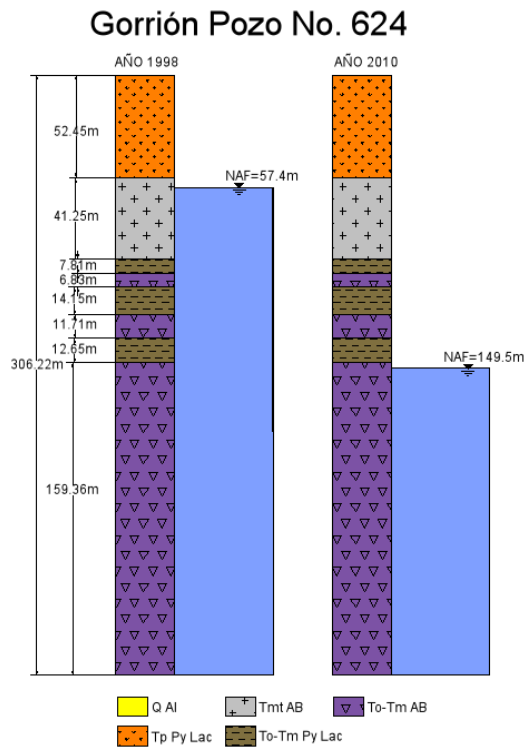


Figura 4.5.6 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Paseo del Gorrion en el Pozo 624.

En la figura anterior se observa que los estratos, en donde influyo el nivel de abatimiento del agua, no se conocen los parámetros de humedad, ni pesos específicos, esto quiere decir que en este punto el asentamiento es cero.

Entonces el asentamiento relativo en este punto es la diferencia de esfuerzos efectivos entre los Pozos 630 y 624 del punto Paseo del Gorrion (ecuación 4.5.3).

$$\Delta H_{GORRION} = 94.71 - 0 = 94.71cm \quad 4.5.3$$

4. PROLONGACIÓN ZARAGOZA

De este punto, se tiene el perfil estratigráfico (Figura 4.4.10), obtenido por Pacheco (2007), además se obtuvieron los espesores de cada estrato así como el nivel de abatimiento del agua en el periodo de tiempo analizado (Figura 4.5.7).

Prol Zaragoza Pozo No. 630

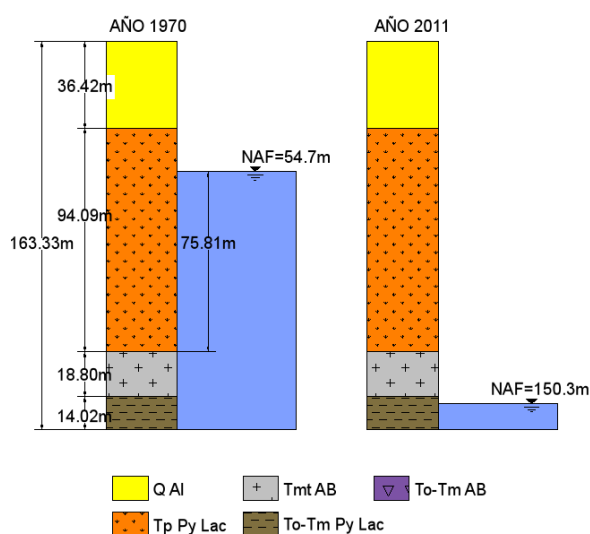


Figura 4.5.7 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Prolongación Zaragoza en el Pozo 630.

El asentamiento en este Pozo ocurre en el estrato TpPy Lac, por medio de la ecuación 4.2.8 (Tabla 4.5.6).

Prolongación Zaragoza POZO 630						
Estrato	$\omega(\%)$	v_s (kg/cm ³)	v_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	7581	122.8313755

Tabla 4.5.6 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Zaragoza del Pozo 630.

También se obtuvieron los espesores, y el nivel de abatimiento del agua de 1970 y 2011, para el Pozo 980 del punto Prolongación Zaragoza (Figura 4.5.8).

Prol Zaragoza Pozo No. 980

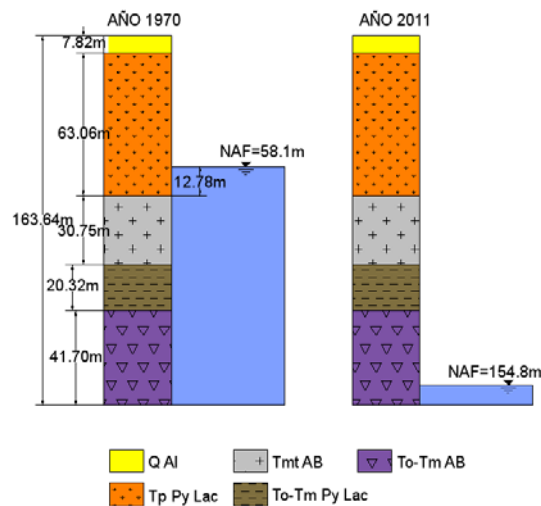


Figura 4.5.8 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Prolongación Zaragoza en el Pozo 980.

En la figura anterior se observa que el estrato que tiene influencia es el TpPy Lac de 12.78m, del cual se obtiene el asentamiento en el Pozo 980 (Tabla 4.5.7).

Prolongación Zaragoza POZO 980

Estrato	$\omega(\%)$	γ_s (kg/cm ³)	γ_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	1278	3.490744235

Tabla 4.5.7 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Zaragoza del Pozo 980.

El asentamiento relativo, que es la diferencia de asentamientos de los Pozos comprendidos en este punto se muestra en la ecuación 4.5.4.

$$\Delta H_{ZARAGOZA} = 122.83 - 3.49 = 119.34cm \quad 4.5.4$$

5. HACIENDA DEL VEGIL

Se cuenta con el perfil estratigráfico (Figura 4.4.13), del trabajo de investigación de Pacheco (2007), del cual se obtuvieron los espesores de los estratos y el nivel de abatimiento del agua de 1970 y 2011 (Figura 4.5.9).

Hda del Vegil Pozo No. 630

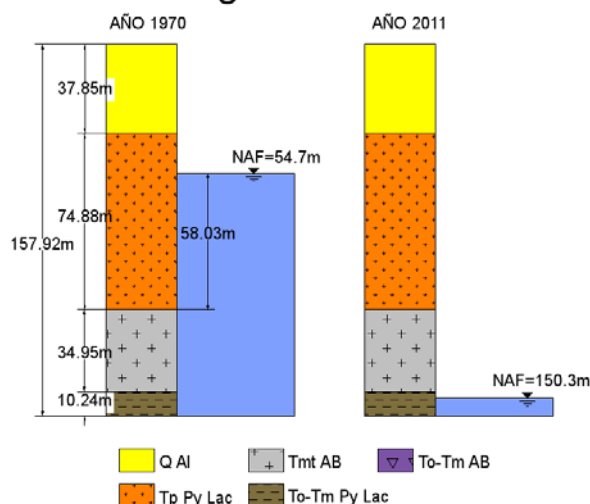


Figura 4.5.9 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Hacienda del Vegil en el Pozo 630.

Se observa que el estrato de influencia es el TpPy Lac, que es donde se conocen los parámetros de humedad y pesos específicos, para el cálculo de asentamiento (Tabla 4.5.8).

Hacienda del Vegil POZO 630

Estrato	$\omega(\%)$	γ_s (kg/cm ³)	γ_s' (kg/cm ³)	E (kg/cm ²)	H' (cm)	Asentamiento (cm)
TpPy Lac	0.37	0.0026	0.0016	459	5803	71.97165061

Tabla 4.5.8 Asentamiento obtenido a través de la ecuación corregida de Pacheco (2007), para suelo no saturado del punto Vegil del Pozo 630.

De la misma manera se obtuvieron los espesores de los estratos, y el nivel de abatimiento del agua para el Pozo 632 de este punto (Figura 4.5.10).

Hda del Vegil No. 632

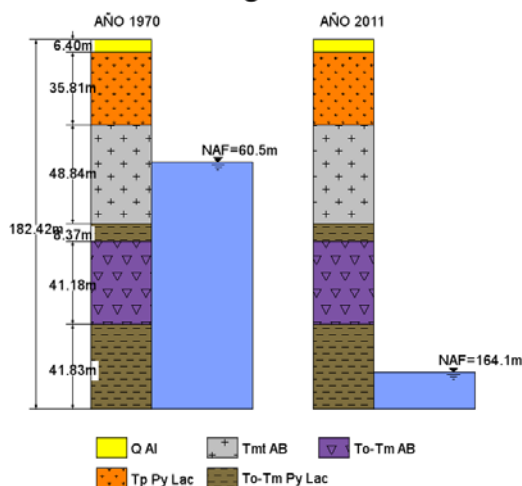


Figura 4.5.10 Espesores y Nivel de Abatimiento del Agua para el punto Hacienda del Vegil en el Pozo 632.

En la figura anterior se observa que el asentamiento es cero, ya que no se cuenta con parámetros de humedad y pesos específicos en donde el nivel de aguas tiene influencia.

El asentamiento relativo en el punto Vegil, es la diferencia de sus asentamientos de los Pozos 630 y 632 (ecuación 4.5.5).

$$\Delta H_{VEGIL} = 71.97 - 0 = 71.97 \text{ cm} \quad 4.5.5$$

Se realizó una lista de los asentamientos relativos (cm) en los 5 puntos analizados por este método (Tabla 4.5.9).

Punto	Asentamiento relativo (cm) por medio de la Ecuación Corregida de Pacheco (2007)
Obreros	175.7021857
Acceso II	57.007872
Gorrión	94.71383806
Vegil	71.97165061
Zaragoza	119.3406312

Tabla 4.5.9 Asentamiento relativo calculado por el método corregido de Pacheco (2007).

4.6. PREDICCIÓN DE AGRIETAMIENTOS EN LA FALLA 5 DE FEBRERO.

Por los métodos de Esfuerzos Efectivos y de Asentamientos para suelos No Saturados, mostrados en esta investigación, se observa que los factores influyentes, cuando se presenta un asentamiento, son los estratos del material, sus espesores y el Nivel de Abatimiento de Agua,

El nivel del agua obtenido de la CEA (Figura 4.3.1), muestra en muchos puntos la estabilización, entre los años 2010 y 2011 (Figura 4.6.1).

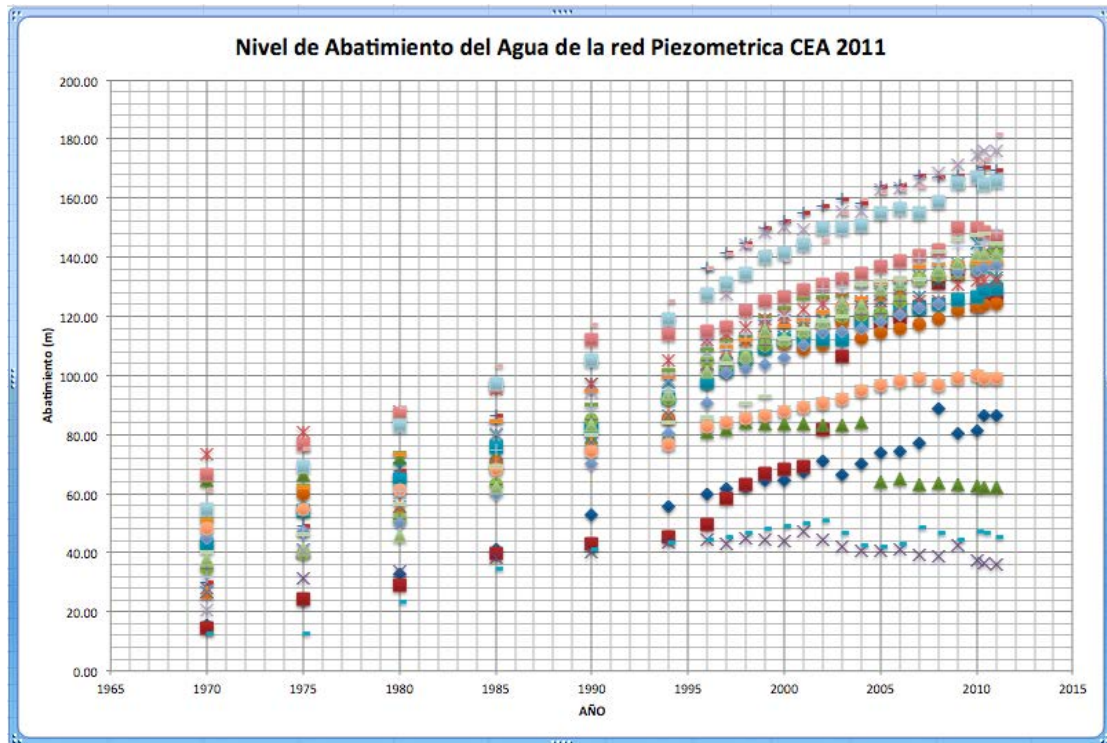


Figura 4.6.1 Nivel de Abatimiento del Agua entre los años 1970 y 2011 obtenidos de la CEA, 2011.

A su vez, sacando el promedio de todos los puntos obtenidos, el nivel bajó entre el año 2010 a 2011, esto quiere decir que se sigue abatiendo el agua en promedio, 18cm, en el Valle de Querétaro (Figura 4.6.2).

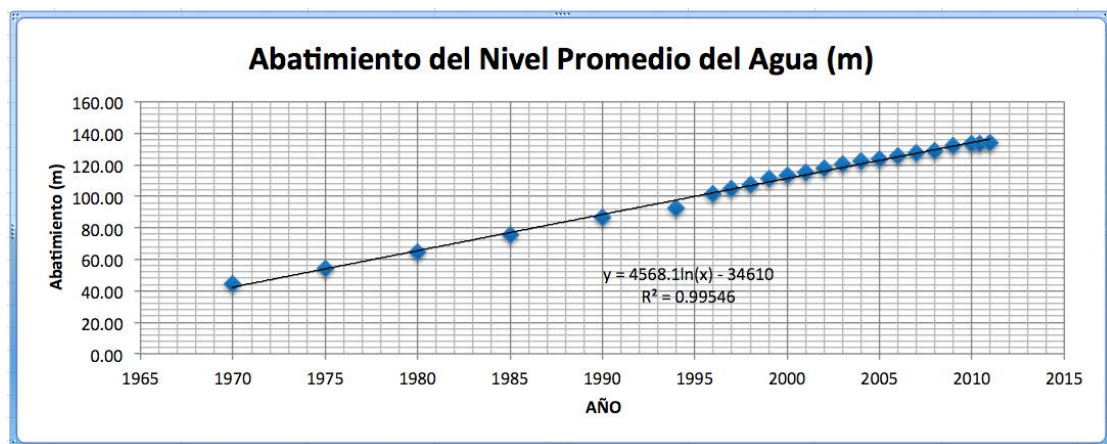


Figura 4.6.2 Nivel de Abatimiento del Agua Promedio para el Valle de Querétaro a Diciembre de 2011.

En la Figura anterior se calculó una tendencia logarítmica con $R^2 = 0.99546$, muy cercano a 1, además de la ecuación 4.6.1, representativa de los valores de asentamiento promedio en el Valle.

$$Abat(m) = 4568.1 * \ln(A\tilde{N}O) - 34610 \quad 4.6.1$$

Con los dos métodos para el cálculo de asentamientos utilizados en esta investigación se puede predecir el asentamiento relativo o diferencial vertical a futuro en un tiempo determinado.

Por el método corregido de Pacheco (2007), se puede predecir el asentamiento hasta que se conozcan más propiedades de los estratos (humedad, pesos específicos de suelo, y pesos específicos de suelo sumergido), en los estratos del Valle de Querétaro.

Por el método de Esfuerzos Efectivos se puede saber cuánto será el asentamiento relativo máximo esperado calculado hasta la profundidad obtenida en los perfiles estratigráficos obtenidos por gravimetría de Pacheco (2007), ya que se conocen los módulos elásticos de cada estrato de material, suponiendo un Nivel de Abatimiento del agua en específico.

Por otro lado se analizaron los asentamientos relativos mostrados en el Capítulo 4.4, y con la Tabla 4.3.3, que muestra los niveles de abatimiento para los puntos del Valle de Querétaro, se hizo una estimación de asentamiento y abatimiento de agua para los años 2020, 2030 y 2050.

1. OBREROS

POZO 1003

Se estimo el Nivel de Aguas Subterráneas para este pozo mediante una tendencia logarítmica entre los años 1970 a 2011, tomando en cuenta la Tabla 4.3.3 (Figura 4.6.3).

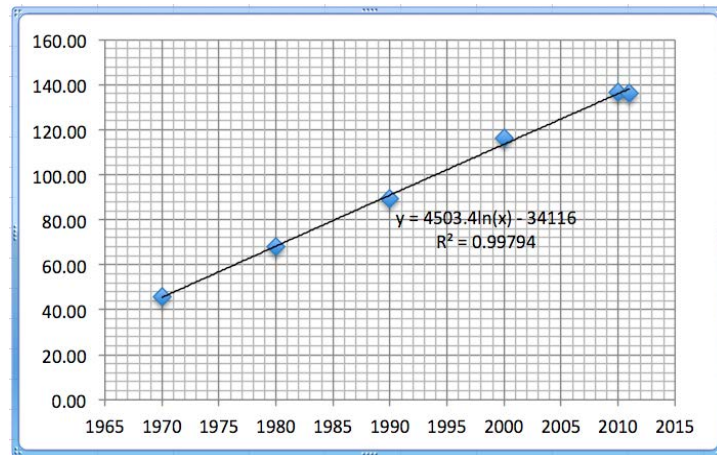


Figura 4.6.3 Tendencia Logarítmica del Nivel de Aguas Subterráneas del punto Obreros, Pozo 1003.

Los valores de abatimiento del agua para los años 2020, 2030 y 2050, se obtuvieron mediante la ecuación (4.6.2), que tiene un $R^2 = 0.997$, y que es resultante de la Figura 4.6.3 (Tabla 4.6.2).

$$Abat_{1003} = 4503.4 * \ln(AÑO) - 34116 \quad 4.6.2$$

Obreros, Pozo 1003			
AÑO	2020	2030	2050
Abat (m)	158.71	180.95	225.1

Tabla 4.6.2 Nivel de abatimiento del Agua calculado, para los años 2020, 2030 y 2050 mediante tendencia logarítmica para el punto Obreros, Pozo 1003.

Al igual que en el Capítulo 4.4, el asentamiento en el pozo 1003, se analizó el perfil estratigráfico del punto Obreros (Figura 4.4.1), se escaló en Autocad 2011, mostrando la diferencia del Nivel de Abatimiento para los años 2020, 2030 y 2050 calculados (Figura 4.6.4).

Obreros Pozo No. 1003

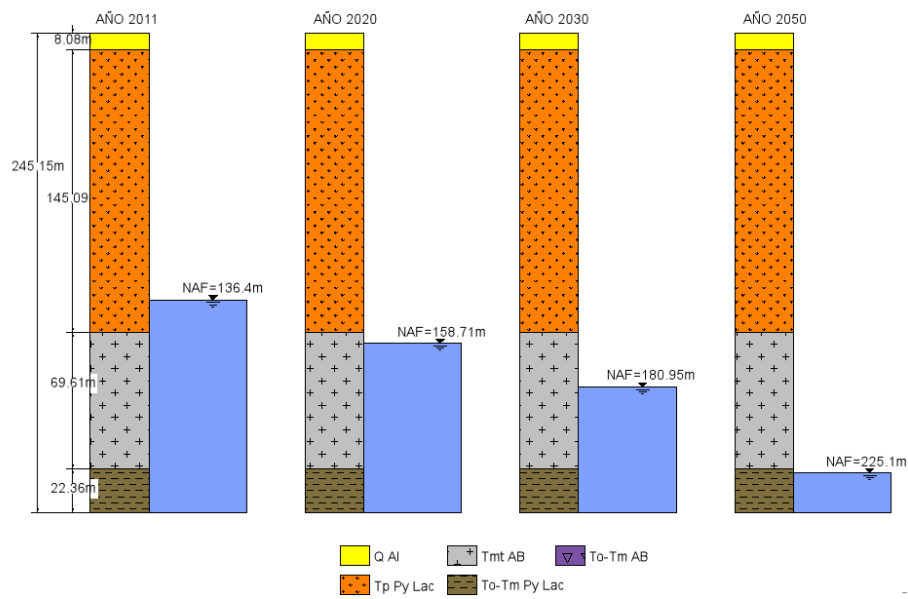


Figura 4.6.4 Perfil estratigráfico y nivel de abatimiento para los años 2020, 2030 y 2050 calculados para el punto Obreros, Pozo 1003.

Para el cálculo del asentamiento en el Pozo 1003 del punto Obreros, se usó la ecuación 3.1.3 (Tabla 4.6.3).

OBREROS = RONCOPOLLO, Pozo 1003						
POZO 1003	Espesor (m)	espacum (cm)	AÑO abat	Abat (cm)	$\Delta\sigma (kg/cm^2)$	AH(cm)
Q AI	8.08	808	2011	13640	0	0
TpPy Lac	145.09	15317	2020	15871	2.231	24.45721773
Tmt AB	69.613	22278.3	2030	18095	2.224	0.014838528
To-Tm Py Lac	22.36	24514.3	2050	22510	4.415	1.829479877
TOTAL						26.30153613

Tabla 4.6.3 Asentamiento (cm), en los años 2020, 2030 y 2050, para el punto Obreros, Pozo 1003.

POZO 954

De la misma manera se obtuvo una tendencia logarítmica entre los años 1970 a 2011 del Nivel de Aguas Subterráneas de este pozo (Figura 4.6.5).

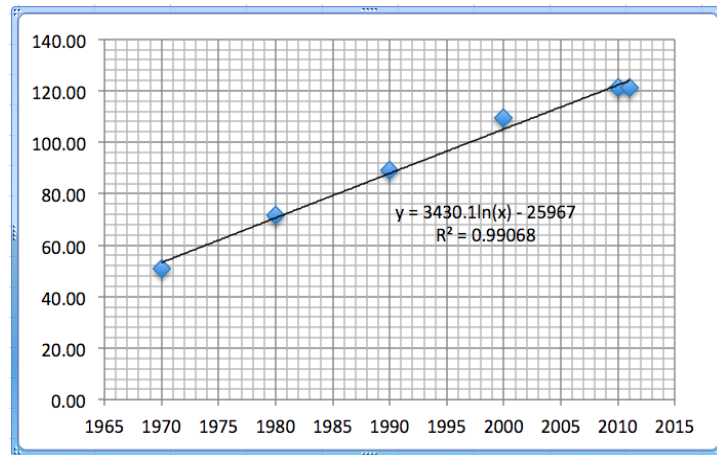


Figura 4.6.5 Tendencia Logarítmica del Nivel de Aguas Subterráneas del punto Obreros, Pozo 954.

El abatimiento del Nivel de Aguas Subterráneas, para los años 2020, 2030 y 2050 se obtuvo mediante la ecuación 4.6.3, de la figura anterior (Tabla 4.6.3), estos valores tienen un $R^2 = 0.99$, lo que significa que dicha tendencia es muy precisa.

$$Abat_{954} = 3430.1 * \ln(AÑO) = 25967 \quad 4.6.3$$

Obreros, Pozo 954			
AÑO	2020	2030	2050
Abat (m)	138.99	155.92	189.55

Tabla 4.6.3 Nivel de abatimiento del Agua calculado, para los años 2020, 2030 y 2050 mediante tendencia logarítmica para el punto Obreros, Pozo 954

Los niveles de abatimiento calculados (Tabla 4.6.3), y los espesores de los estratos del Pozo 954 se muestran en la Figura 4.6.6.

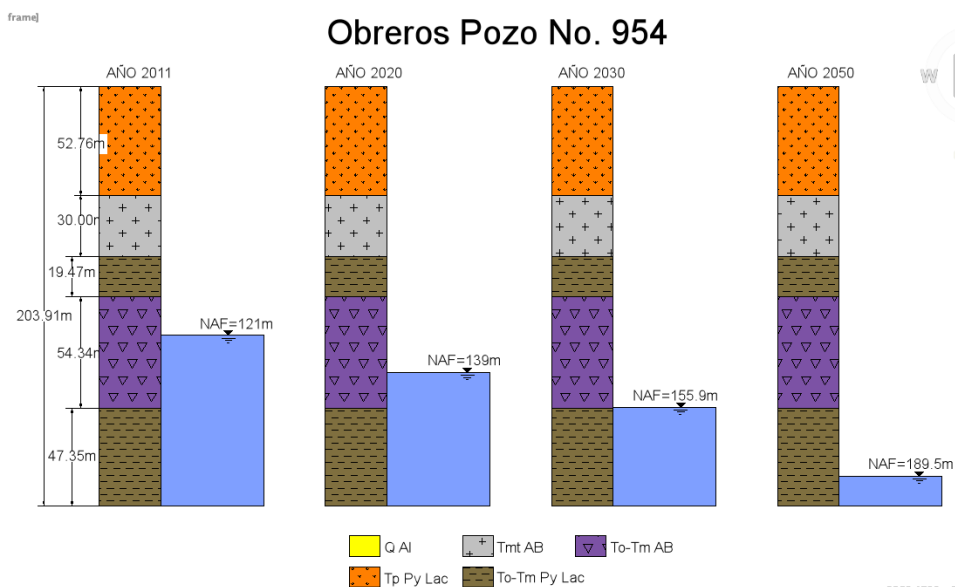


Figura 4.6.6 Perfil estratigráfico y nivel de abatimiento para los años 2020, 2030 y 2050 calculados para el punto Obreros, Pozo 954.

El asentamiento en el Pozo 954 del punto Obreros, se obtuvo mediante la ecuación 3.1.3 (Tabla 4.6.4).

RONCOPOLLO = OBREROS, Pozo 954

POZO 954	Espesor (m)	espacum (cm)	AÑO abat	Abat (cm)	$\Delta\sigma (kg/cm^2)$	AH(cm)
TpPy Lac	52.76	5276	2011	12100	0	0
Tmt AB	30	8276	2020	13900	1.8	0.00972
To-Tm Py Lac	19.47	10223	2030	15590	1.69	0.0085683
To-Tm AB	54.34	15657	2050	18950	3.36	16.59739536
To-Tm Py Lac	126.122	28269.2			TOTAL	16.61568366

Tabla 4.6.4 Asentamiento (cm), en los años 2020, 2030 y 2050, para el punto Obreros, Pozo 954.

El asentamiento relativo en el punto Obreros analizado en esta investigación, es la diferencia de los asentamientos de los pozos 1003 y 954 (ecuación 4.6.4).

$$\Delta H_{OBREROS} = 26.3 - 16.61 = 9.69 \text{ cm} \quad 4.6.4$$

De la misma manera se calcularon los abatimientos del Nivel de Aguas Subterráneas, para los años 2020, 2030 y 2050 (Tabla 4.5.6).

PUNTO/AÑO	2011	2020	2030	2050
<i>Obreros P1003</i>	136.40	158.71	180.95	225.10
<i>Obreros P954</i>	121.00	139.00	155.90	189.50
<i>Acceso Il P952</i>	134.50	153.57	172.80	210.97
<i>Acceso Il P957</i>	132.50	152.37	171.17	208.50
<i>Gorrión P630</i>	150.30	173.73	197.88	245.88
<i>Gorrión P624</i>	149.50	173.89	196.74	242.10
<i>Hacienda del Vegil P630</i>	150.30	173.73	197.88	245.88
<i>Hacienda del Vegil P632</i>	164.10	190.58	216.43	267.75
<i>Prol. Zaragoza P630</i>	150.30	173.73	197.88	245.88
<i>Prol. Zaragoza P980</i>	154.80	179.70	203.76	251.51
<i>Adjuntas Agrogen P982</i>	141.00	160.19	184.75	233.52
<i>Adjuntas Agrogen P605</i>	132.90	153.17	174.82	217.80
<i>Jurica P1296</i>	63.70	69.26	73.70	82.52
<i>Jurica P1978</i>	66.00	75.70	79.72	87.71
<i>Jurica P1795</i>	83.10	95.58	106.22	127.34
<i>Balvanera Flores P656</i>	170.10	194.65	223.15	279.75
<i>Balvanera Flores P663</i>	155.20	179.34	206.20	259.51
<i>Balvanera Flores P627</i>	134.30	154.97	177.46	222.10
<i>Vanegas P910</i>	156.60	179.07	205.60	258.27
<i>Vanegas P605</i>	132.90	153.17	174.82	217.80
<i>Obrera P995</i>	124.00	143.15	161.80	198.82

<i>Obrera P822</i>	113.40	128.84	149.46	175.47
<i>Jacal P632-A</i>	155.00	179.79	204.60	253.84
<i>Jacal P632</i>	164.10	190.58	216.43	267.75
<i>Tlacote P1817</i>	136.20	158.54	181.51	227.13
<i>Tlacote P624</i>	149.50	173.89	196.74	242.10

Tabla 4.6.5 Nivel de Abatimiento estimado (m), para los años 2020, 2030 y 2050.

El asentamiento, se calculó por el método de Esfuerzos Efectivos para el periodo de tiempo entre 2011 y 2050 (Figura 4.6.6).

<i>PUNTO</i>	<i>Asentamiento (cm)</i>
<i>Obreros P1003</i>	26.30
<i>Obreros P954</i>	16.62
<i>Acceso II P952</i>	12.53
<i>Acceso II P957</i>	28.37
<i>Gorrión P630</i>	38.18
<i>Gorrión P624</i>	0.10
<i>Hacienda del Vegil P630</i>	38.18
<i>Hacienda del Vegil P632</i>	20.83
<i>Prol. Zaragoza P630</i>	38.18
<i>Prol. Zaragoza P980</i>	8.34
<i>Adjuntas Agrogen P982</i>	21.14
<i>Adjuntas Agrogen P605</i>	8.39
<i>Jurica P1296</i>	8.39
<i>Jurica P1978</i>	0.04
<i>Jurica P1795</i>	9.39
<i>Balvanera Flores P656</i>	49.52
<i>Balvanera Flores P663</i>	226.63
<i>Balvanera Flores P627</i>	191.23
<i>Vanegas P910</i>	41.44
<i>Vanegas P605</i>	8.39
<i>Obrera P995</i>	25.05
<i>Obrera P822</i>	20.10
<i>Jacal P632-A</i>	11.74
<i>Jacal P632</i>	20.83
<i>Tlacote P1817</i>	32.74
<i>Tlacote P624</i>	0.10

Tabla 4.6.6 Asentamiento relativo calculado por Esfuerzos Efectivos para el año 2050.

CAPITULO 5 RESULTADOS

En este Capítulo se muestran los resultados y diferencias entre los dos métodos de asentamiento utilizados en este trabajo de tesis, se hizo énfasis en el diferencial vertical de cada uno de los 12 puntos analizados, el cual se observa en la superficie como un escalón de falla y que en realidad es el problema que afecta a edificaciones y tuberías del área de aproximadamente 12 Km^2 que comprenda Falla 5 de Febrero, y en toda la zona Urbana del Valle de Querétaro.

Dicho diferencial vertical tiene diferentes asentamientos para cada punto, que va desde 0.29 hasta 1.051m, con el monitoreo de asentamientos hasta el año 2010 (Tabla 4.2.3), y de manera gráfica (Figura 4.2.2), en conjunto.

Sobre esta actualización se graficaron los puntos de manera individual para representar el asentamiento de manera más clara (Figura 5.1).

De igual manera mostrando el diferencial vertical, pero en representación de la superficie, y el año en que se tomo la lectura de asentamiento se tiene la Figura 5.2, donde se puede observar la diferencia de la superficie cada vez que se tomaron medidas de dicho diferencial vertical.

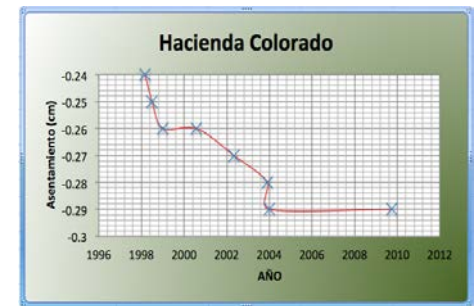
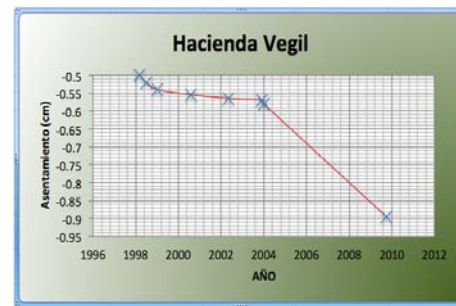
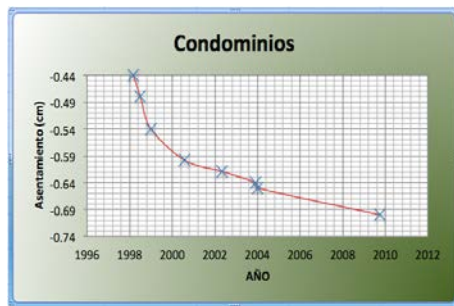
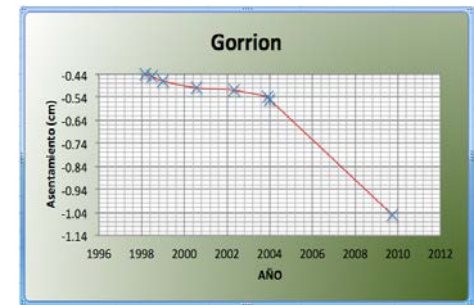
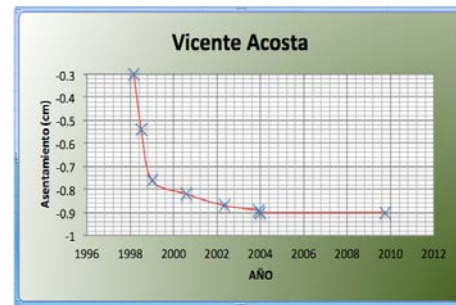
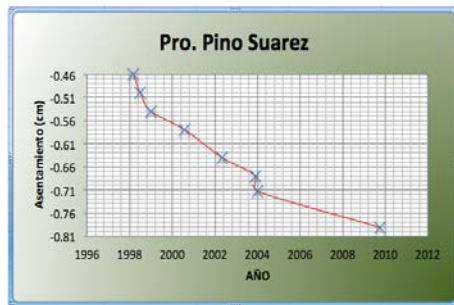
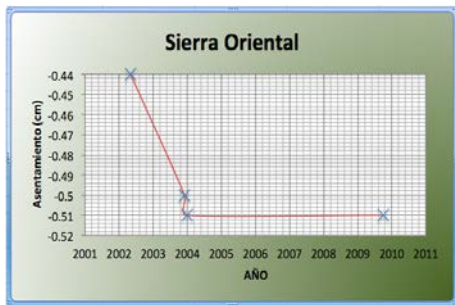
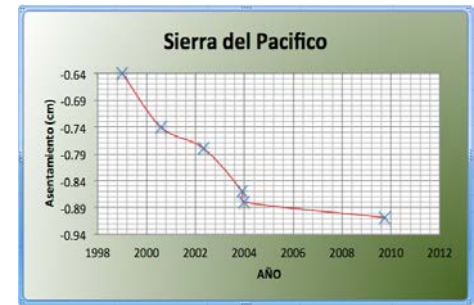
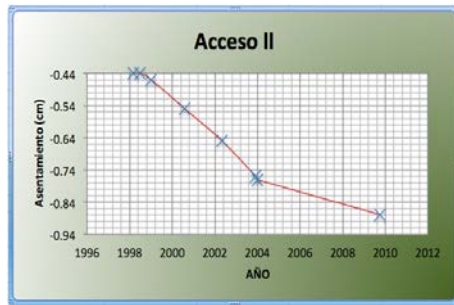


Figura 5.1 Diferencial vertical medido en sitio de cada uno de los puntos analizados en la Falla 5 de Febrero entre los años 1998 y 2010.

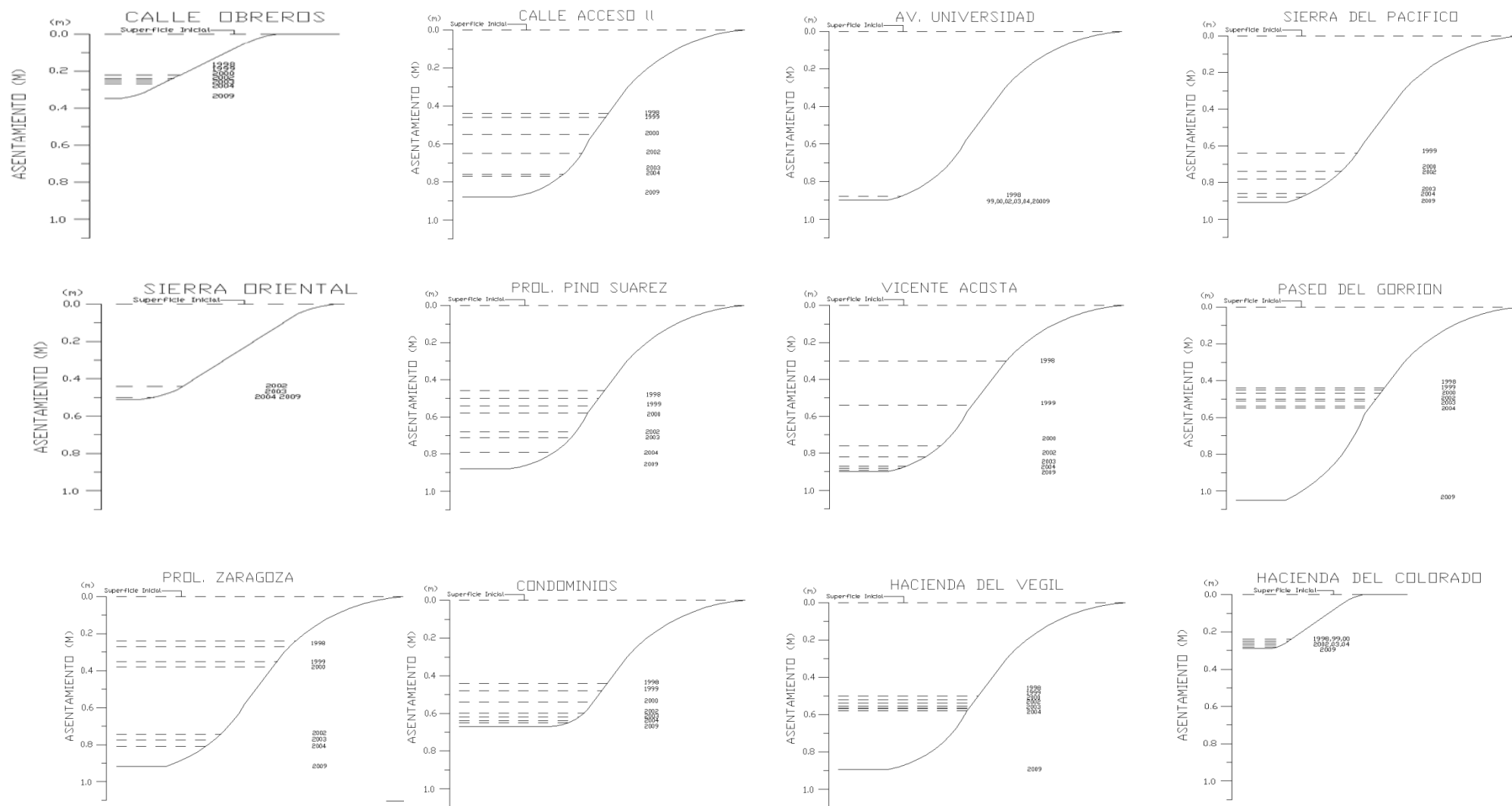


Figura 5.2 Diferencial real medido en sitio en los intervalos de tiempo que comprende el periodo de 1998 a 2011.

En el análisis de asentamiento por el métodos de Esfuerzos efectivos se graficaron los resultados mediante curvas de Nivel por el método de Interpolación de Topo toRaster (Figura 5.3).

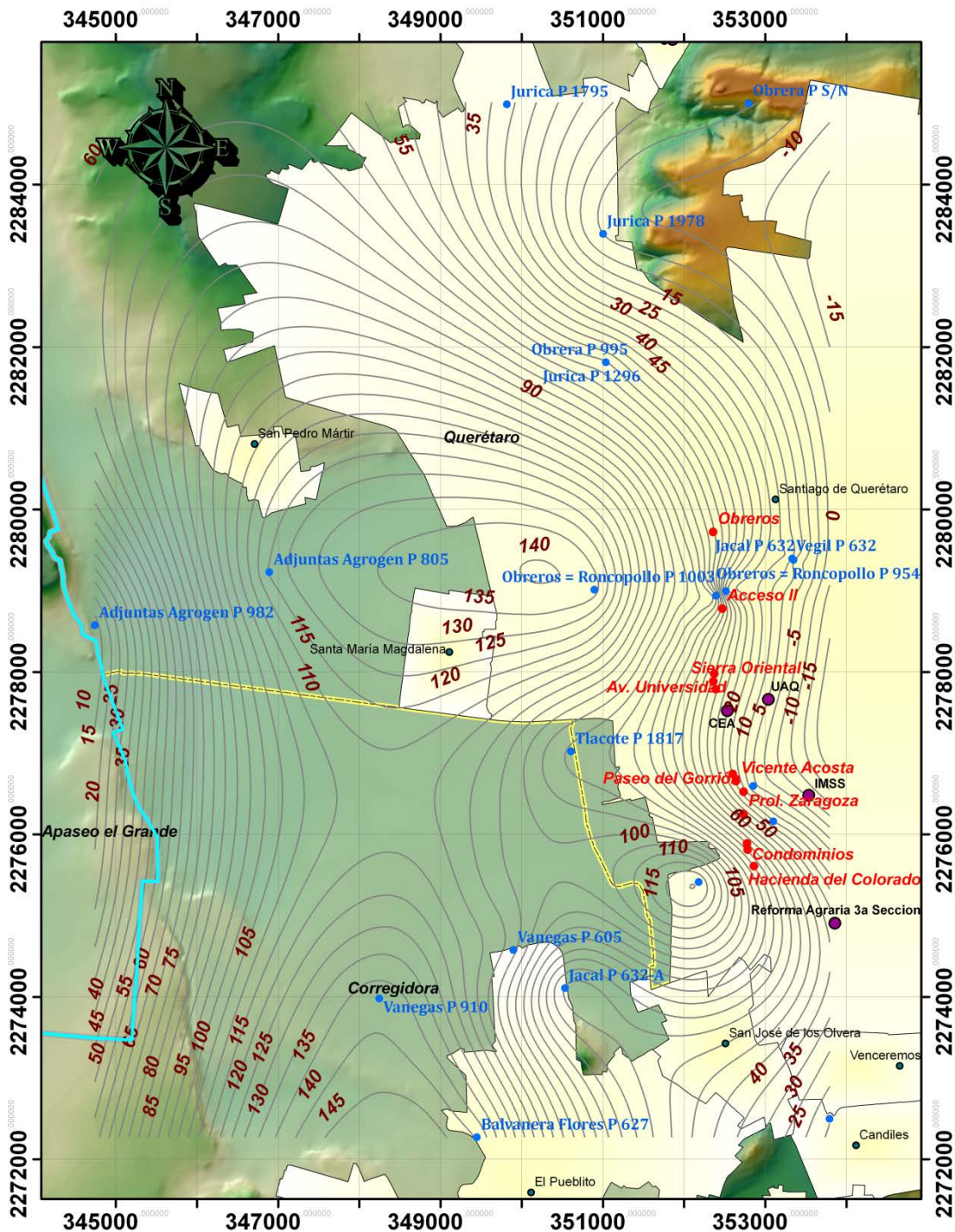


Figura 5.3 Curvas de nivel de asentamiento por el método de Esfuerzos efectivos en el Valle de Querétaro.

La figura anterior es el resultado del análisis de los diferenciales verticales en el Valle de Querétaro, sirve para detectar posibles fallas a futuro

ya que las curvas de Nivel de Asentamiento, siguen paralelamente a las fallas actuales y posiblemente a las Fallas futuras en el Valle de Querétaro. Esto se puede observar haciendo una comparación con la figura 4.3.1 en el Capítulo 4 de esta investigación.

Por otro lado los diferenciales obtenidos de los 5 puntos analizados mediante los métodos de Asentamientos por Esfuerzos Efectivos (Terzaghi 1956), y Asentamientos por la ecuación corregida de Pacheco (2007), parecen estar muy cercanos a las lecturas tomadas en sitio (Tabla 5.1).

<i>Punto</i>	<i>Asent (cm) por Ecuación corregida Pacheco (2007)</i>	<i>Asentamiento por Esfuerzos Efectivos (cm)</i>	<i>Dif. Vertical Medido en Sitio (cm)</i>
<i>Obreros</i>	<i>175.70</i>	<i>129.50</i>	<i>34.63</i>
<i>Acceso II</i>	<i>57.01</i>	<i>49.21</i>	<i>87.86</i>
<i>Gorrión</i>	<i>94.71</i>	<i>94.08</i>	<i>105.10</i>
<i>Vegil</i>	<i>71.97</i>	<i>77.05</i>	<i>89.54</i>
<i>Zaragoza</i>	<i>119.34</i>	<i>98.51</i>	<i>91.71</i>

Tabla 5.1 Comparación de los diferenciales calculados por los 2 métodos utilizados, con los tomados en sitio en la Falla 5 de Febrero.

El asentamiento esperado, depende principalmente del Nivel de Aguas Subterráneas, por esta razón en el Capítulo de predicción de asentamientos, se estimo dicho nivel, además se cuenta con el asentamiento hacia Futuro, calculado por el Método de Esfuerzos Efectivos entre los años 2011 a 2050 (Figura 5.4).

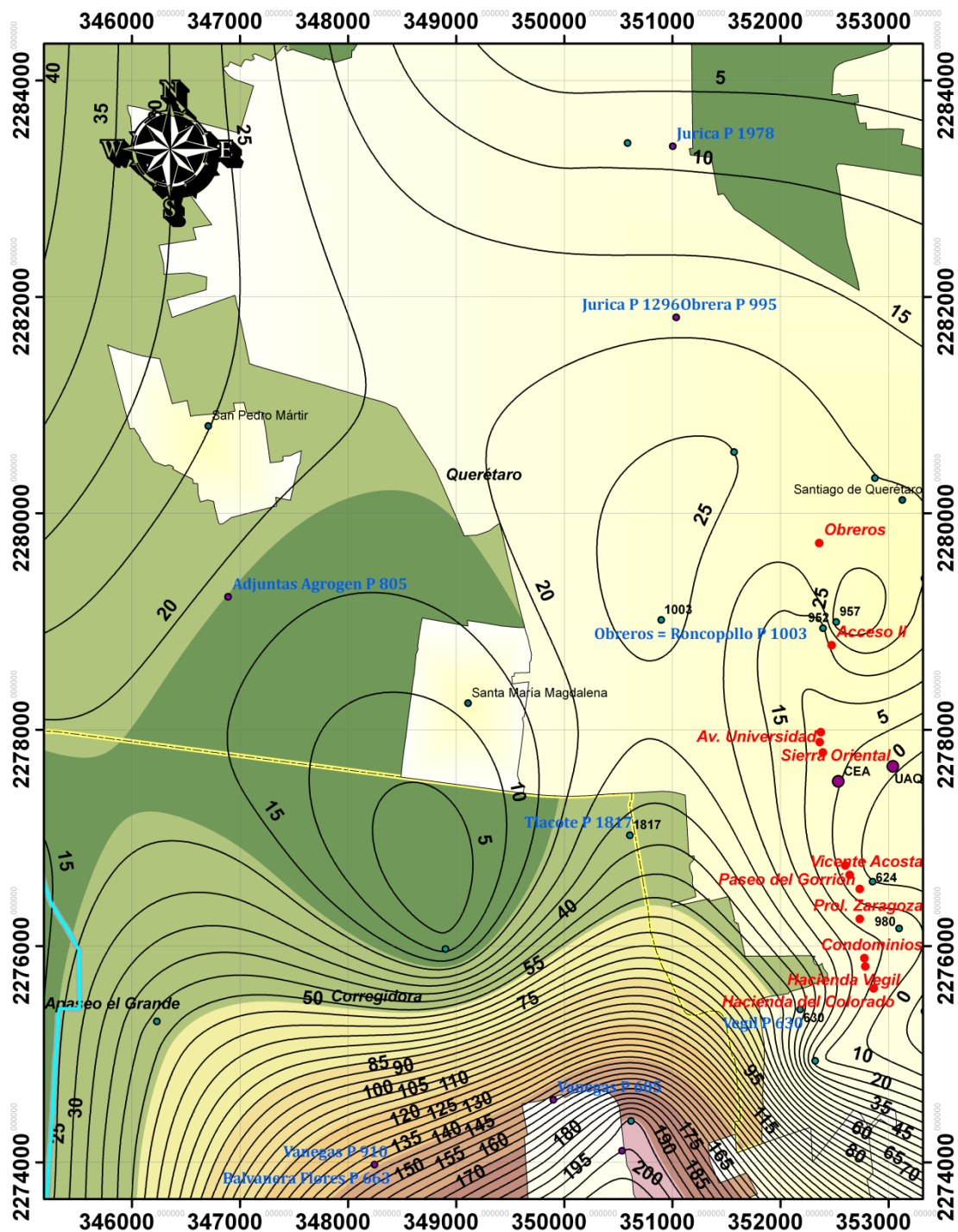


Figura 5.4 Asentamiento estimado por Esfuerzos Efectivos para el periodo de tiempo de 2011 a 2050.

Por otro lado, es necesario tomar en cuenta el lecho rocoso del Valle de Querétaro, es por eso que se realizó una interpolación del tipo Topo toRaster de la profundidad del Estrato Tmt AB (Figura 5.5).

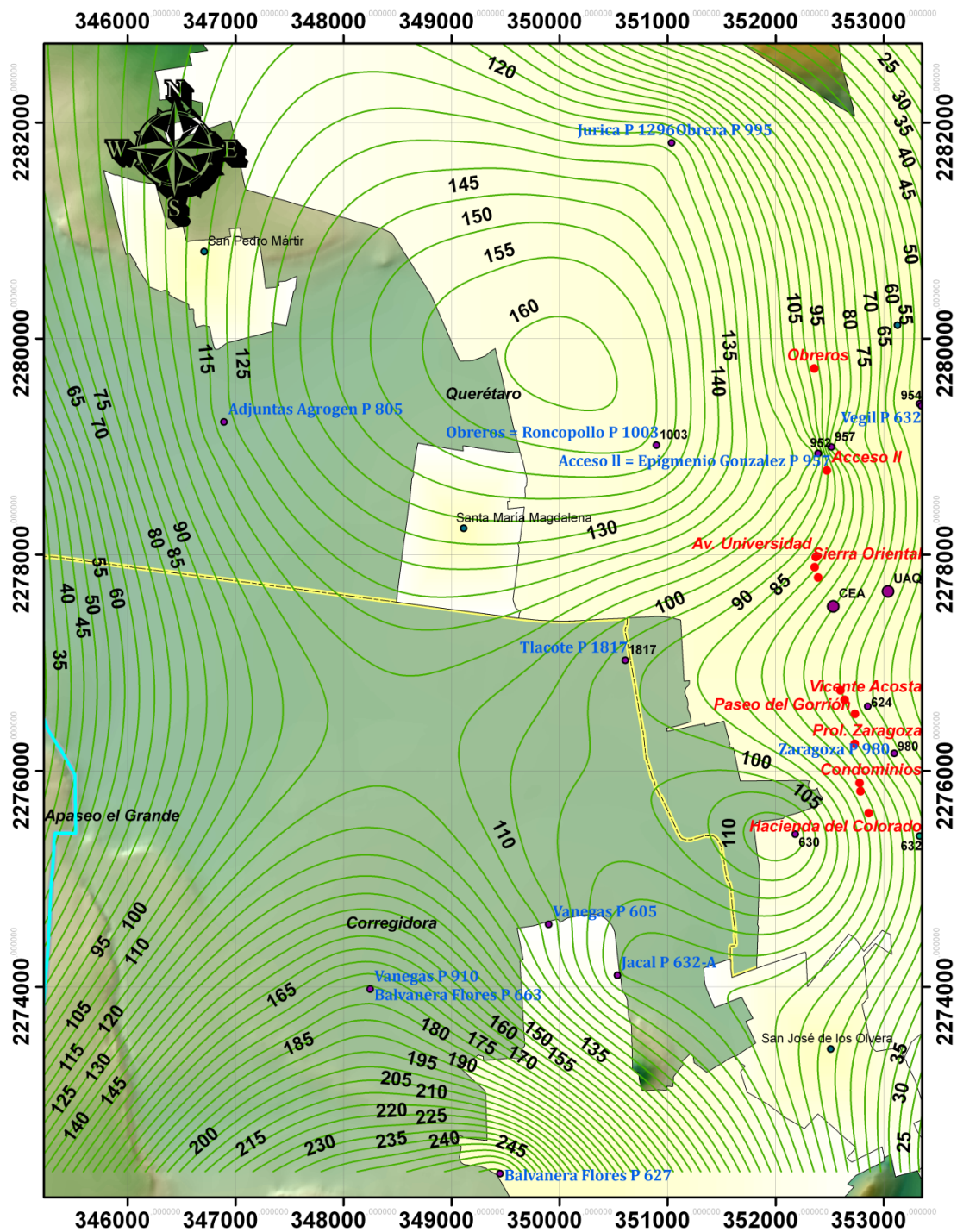


Figura 5.4 Profundidad del Estrato Tmt AB, para el Valle de Querétaro.

En la figura anterior se observan las isolíneas en para el lecho rocoso en el Valle de Querétaro, este mismo análisis lo realizó Álvarez Manilla (2000), el cual se puede comparar con los resultados obtenidos en esta investigación (Figura 5.5).

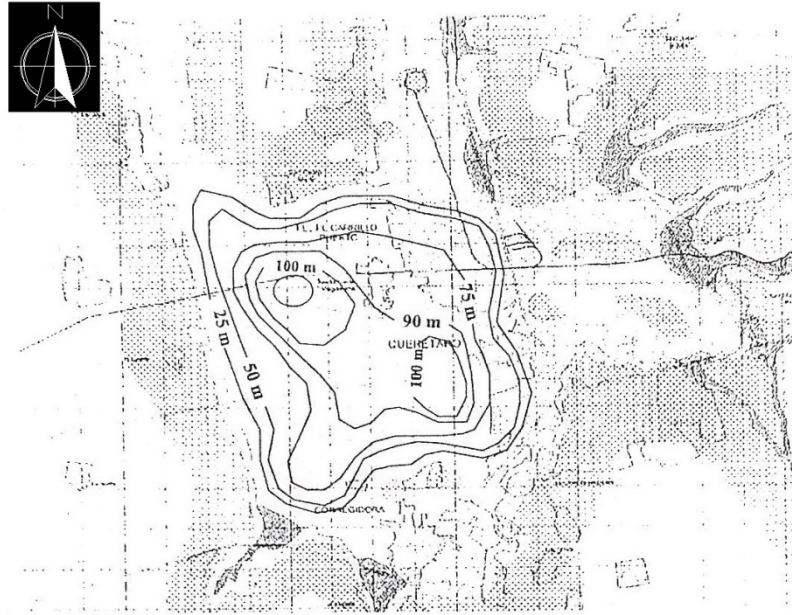


Figura 5.5 Profundidad al basamento Geotécnico, formado por la unidad Menchaca (Tmbm) (Álvarez Manilla, 1999).

El resultado de la comparación entre las figuras 5.4 y 5.5, nos muestran resultados parecidos, con variaciones que pudieran ser debido a la diferencia de tiempo, cuando las lecturas fueron tomadas del basamento rocoso,

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

Al iniciar este trabajo de investigación se habló de los daños estructurales a viviendas y tuberías del Valle de Querétaro, en la Figura 6.1 se muestran las consecuencias de la excesiva extracción de agua del subsuelo en la ciudad, donde se observan muchas reparaciones realizadas en el pasado.



Figura 6.1 Daños graves visibles en el exterior de una vivienda en la colonia la Sierrita.

En los métodos de Esfuerzos Efectivos y corregido de Pacheco es posible que no se tome en cuenta los diversos trabajos de repavimentación y/o empedrado, o a su vez alguna posibilidad de relleno en alguno de los puntos de Falla analizados en este trabajo de tesis, porque, al poner el ejemplo de la Avenida Universidad, se tienen asentamiento de 2cm en 11 años, lo cual nos indica que el asentamiento y diferencial no se presentaría menos de que se tenga otro tipo de argumentos mencionados anteriormente, sin embargo en la mayoría de los puntos medidos se cuenta aún con los primeros testigos por lo que las mediciones se pueden tomar como confiables en general.

Cabe mencionar que de los 5 puntos que se analizaron por los dos métodos solo 3 contaban con perfil estratigráfico obtenido por gravimetría

(Vegil, Gorrión y Zaragoza), los puntos Obreros y Acceso II se tomo un perfil relativamente cercano que al parecer tiene las mayores diferencias del asentamiento relativo o diferencial vertical entre los dos métodos analizados y los diferenciales reales medidos en sitio.

En el Capítulo de predicción de asentamientos, se tomo en cuenta el Método de Esfuerzos Efectivos, y se realizó una interpolación logarítmica para estimar el abatimientos en los años 2020, 2030 y 2050, este método resulta factible porque el porcentaje de acierto en la interpolación logarítmica se encuentra muy cercano al 100%, además de que se cuenta con los perfiles estratigráficos de los puntos del Valle de Querétaro, es necesario hacer la observación que el resultado de estos asentamientos comprende el periodo de tiempo 2011 a 2050, del cual se obtuvo interpolación por el método Topo toRaster de ArcGis 9.3 y cuyos asentamientos coinciden en su magnitud, con el mapa del lecho rocoso mostrado.

Por otro lado, se observa en la Figura 5.1 que los puntos medidos en sitio en el año 2010 en la Falla 5 de Febrero, parecen seguir la tendencia de las lecturas tomadas entre los años 1998 a 2004, a excepción de los puntos Hacienda del Vegil y Paseo del Gorrión, donde se observa que se dispara el diferencial vertical tomado; esto no se puede explicar con los mapas de abatimiento a futuro y del lecho rocoso Tmt AB, sin embargo, se analizaron bajo el método de Esfuerzos Efectivos, obteniendo resultados muy similares, este fue el motivo del análisis de dichos puntos en específico.

Otro punto importante es el mapa de curvas de nivel de asentamientos obtenido con interpolaciones (Figura 5.3), de los resultados del asentamiento por Esfuerzos Efectivos, ya que como se mencionó, comparándolo con el mapa de Pacheco (2007), donde denota las Fallas Geológicas en el Valle de Querétaro (Figura 4.3.1), se pueden ubicar fallas futuras ya que según el análisis por Esfuerzos Efectivos las líneas tenderán a juntarse porque toman una forma paralela con las Fallas existentes.

En los Niveles de la Red Piezométrica de Abatimiento del Agua proporcionada a esta investigación por la CEA, 2011, en algunos pozos se observa en lugar de abatimiento, una recarga de nivel entre los años 2010 y 2011, esto parecer ser gracias a que empezó a trabajar el proyecto del Acueducto 2 a principios del año 2011, sin embargo el promedio de abatimiento

en general fue de 18cm en ese periodo de tiempo que comprende Diciembre de 2010 a Diciembre de 2011.

CAPITULO 7. ANEXOS.

Se tomó además material fotográfico, para ilustrar los daños superficiales debido a la Subsistencia en la Falla 5 de Febrero, y se suponen daños aun mas graves en las redes de tuberías expuestas a esta falla.

Av. Universidad.



Figura 7.1 Foto del Diferencial vertical en la Av. Universidad.

En este punto de falla, el diferencial vertical no ha cambiado desde el año 2000, quiere decir que lleva 11 años sin movimiento relativo documentado.

Acceso II.



Figura 7.2 Foto tomada al Diferencial vertical en Acceso II.

Se observa en la Figura 7.2 que el diferencial vertical pasa paralelo a esta calle, en el lado derecho de la falla se nota la inclinación de los automóviles estacionados, la Fabrica del lado derecho aún no muestra daños estructurales visibles.

Ensueño.



Figura 7.3 Foto del Diferencial Vertical en Ensueño.

Se observan daños estructurales en el Fraccionamiento Ensueño, en las Guarniciones laterales.

Paseo del Gorrión.

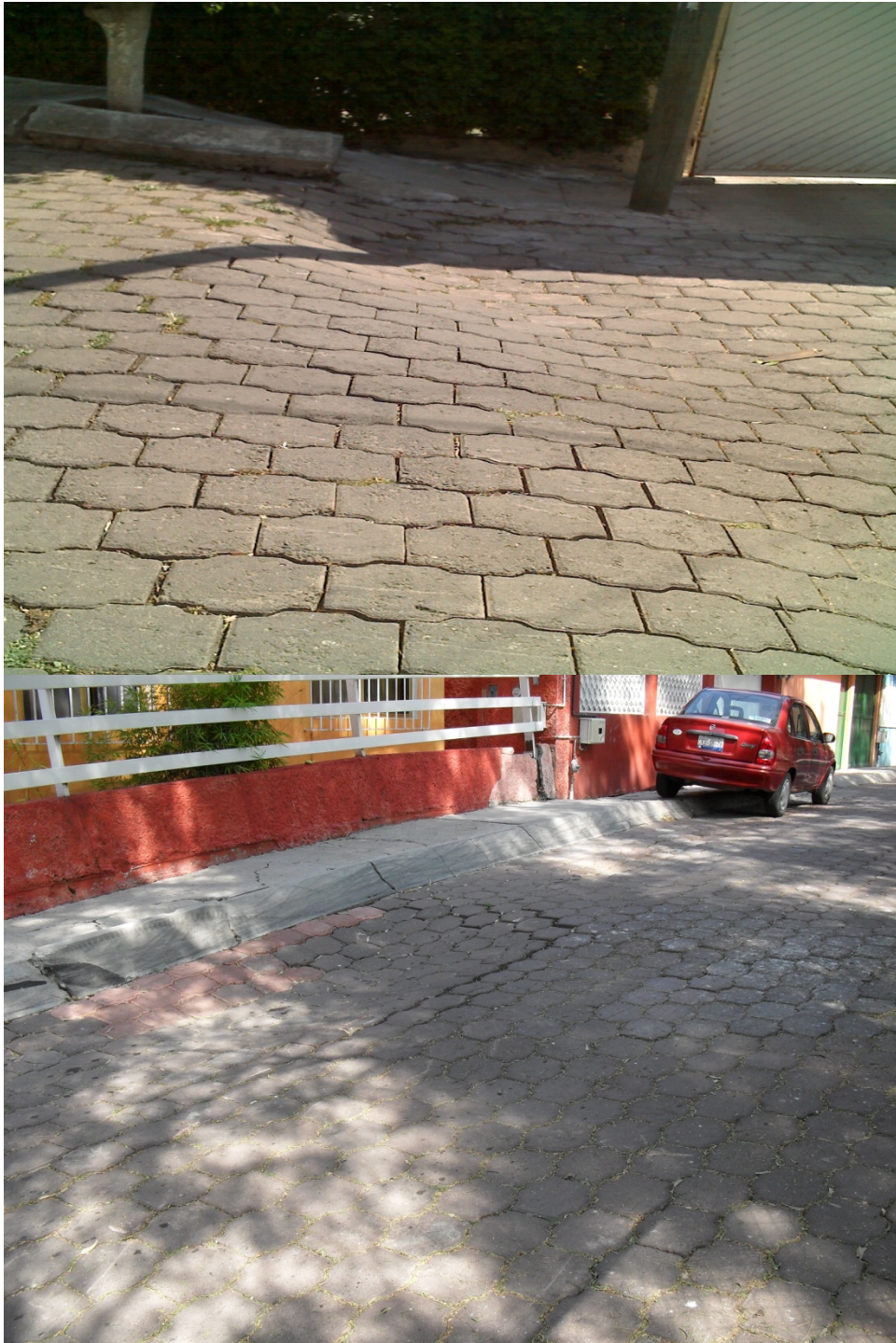


Figura 7.4 Diferencial Vertical en la calle Gorrión.

En este punto en particular que tiene un diferencial vertical medido de 1.051m, al año 2011, se observa además de la falla por subsidencia una falla local, donde muestra reparaciones en el pasado.

Condominios.



Figura 7.5 Diferencial vertical en el punto Condominios.

En la figura anterior se observan daños graves a la edificación de la primera foto, la casa se encuentra literalmente inclinada, en la segunda foto es notorio que los condominios al lado izquierdo libraron, milagrosamente la falla por subsidencia hasta el año 2011.

La Sierrita.



Figura 7.6 Diferencial Vertical Sierra Oriental y Sierra del Pacífico.

Se observa el diferencial vertical en las calles de la colonia la Sierrita, donde no se han realizado trabajos de mantenimiento por años, y los daños estructurales a banquetas y vivienda se hacen obvios.

REFERENCIAS

1. Aguilar-Pérez L. A., Ortega-Guerrero A. A., Lugo-Hubp J. y Ortiz-Zamora D. del C., 2006; Análisis numérico acoplado a 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, p. 247-261.

2. Aguirre-Díaz, G. J., Zúñiga Dávila Madrid, R., Pacheco Alvarado, F.J., Guzmán Speziale, M., y Nieto Obregón, J., 2000; El graben de Querétaro, Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo: Geos, boletín de la Unión Geofísica Mexicana, v. 20, p. 2-7.

3. Aguirre-Díaz G. J., Nieto-Obregón y Zúñiga F. R., 2005; Seismogenic Basis and Range and intra-arc normal faulting in the central Mexican Belt, Querétaro, México: Geological Journal, 40: 215-243.

4. Alaniz-Álvarez S. A, Nieto-Samaniego A. F., Reyes-Zaragoza M. A., Orozco-Esquivel M. T., Ojeda-García A. C. y Vassallo F. L., 2001; Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. V. 18, n. 2, p. 129-148.

5. 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

6. Arroyo M., Arzate J., Rojas E., Ríos R., Pacheco J. y Arnold C., 1999; Causas y efectos de las fallas y agrietamientos en los valles de Querétaro y Celaya: Simposio Internacional sobre el aprovechamiento integral del agua en regiones semiáridas: "El agua en Querétaro, última llamada", Noviembre de

1999, U.A.Q., Querétaro México.

7. Arroyo M., Arzate J., Yutsis V., Martínez J., 2002; Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro, área de geofísica, geología y geotecnia. Reporte Comisión Estatal de Agua (CEA), Querétaro, México.

8. Auvinet G. y Bouvard D., 1983; Efectos de escala geométrica en medios granulares: Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM no. 473.

9. 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.

10. Burbey T. J., 2002; The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA: Hydrogeology Journal, 10, p. 525-538.

11. Carpenter M. C., 1999; Land subsidence in the United State: Circular 1182, U. S. Geological Survey. Galloway D., Jones D. R. e Ing Ground Water, South-Central Arizona. p. 65-81.

12. Carreón-Freyre D., Cerca M., Luna-González L. y Gámez-González F. J., 2005; Influencia de la estratigrafía y estructuración geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro: Revista Mexicana de ciencias Geológicas, v. 22, num 1, p. 1-18.

13. CENAPRED, 2001; Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México: Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana

2001.

14. Chávez Alegría O, y Arzate Flores J. A; (2008); Modelación física-experimental del fenómeno de subsidencia, Centro Universitario Querétaro, Qro, México.

15. Chiodi, M., Monod, O., Busnardo, R., Gaspar, D., Sanchez, A., Yta, M., 1988, Une discordance ante Albiennedatée par unefauned'ámmoniteset de braquiopodes de typeTéthysienauMexique Central: Geobios, 21, 125-135.

16. CNA, 2000; Determinación de la disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Querétaro, Estado de Querétaro: Comisión Nacional del Agua, Subdirección general técnica, Gerencia de Aguassubterráneas.

17. CNA, 2000b; Determinación de la disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle deAmazcala, Estado de Querétaro: Comisión Nacional del Agua, Subdirección generaltécnica, Gerencia de Aguas subterráneas.

18. CNA, 2002; Determinación de la disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle deSan Juan del Río, Estado de Querétaro: Comisión Nacional del Agua, Subdireccióngeneral técnica, Gerencia de Aguas subterráneas.

19. CNA, 2002b; Determinación de la disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle deTequisquiapan, Estado de Querétaro: Comisión Nacional del Agua, Subdireccióngeneral técnica, Gerencia de Aguas subterráneas.

20. Figueroa-Vega G., 1984; Case history 9.8: México D.F., México: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, p. 217-232

21. Helm, D. C., 1975; One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pyxley, California, 2, Constant parameters: Water Resources Research, Vol. 11, No. 3, pp. 465-478

22. Helm, D. C., 1976; One-dimensional simulation of aquifer system compaction near Pyxley, California, 1, stress-dependent parameters: Water Resources Research, Vol. 12, No. 3, pp. 375-391

23. 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.

24. Juárez Badillo E, y Rico Rodríguez A. Mecánica de Suelos, Tomo I (2005); Fundamentos de la Mecánica de Suelos, Limusa, México.

25. Meyer, W.R., y Carr, J.E., 1979, A digital model for simulation of ground-water hydrology in the Houston area, Texas: Texas Department of Water Resources Report LP-103, 27 p.

26. Mishra S. K., Singh R. P. and Chandra S., 1993; Prediction of subsidence in the Indo-gangetic basin carried by groundwater withdrawal: Engineering Geology, 33, p. 227-239

27. Ortega-Guerrero A. Cherry J. A. and Rudolph D. L., 1993; Large-scale aquitard consolidation near Mexico City: Ground water, Vol. 31, No. 5, p.708-718

28. Ortega-Guerrero A., Rudolph L. D. y Cherry J. A., 1999; Analysis of

long-term land subsidence near México City: Field investigations and predictive modelling: *Water Resources Research*, vol. 35, no. 11, p. 3327-3341.

29. Pacheco Martínez J, y Arzate Flores J. A (2007); Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos, Centro de Geociencias, UNAM campus Juriquilla, Querétaro, México.

30. Poland J. F. ., 1984; Mechanics of land subsidence due to fluid withdrawal: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, p. 37-54.

31. Poland J. F. y Lofgren B. E., 1984; Case history 9.13: San Joaquin Valley, California, U.S.A.: Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal, prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, Joseph F. Poland Chairman and Editor, p. 263-278

32. 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.

33. Rivera A. y Ledoux E., 1991; Nonlinear modeling of groundwater flow and total subsidence of the México City aquifer-aquitard system: Land subsidence. Proceedings of the fourth International Symposium on Land Subsidence IAHS Publ.no. 200. p. 45-58.

34. Salazar J. y Zepeda A., 2009: Propiedades esfuerzo-deformación de suelos no saturados; Investigación comparativa experimental laboratorio vs

Parámetros sismológicos in situ. Centro Universitario (UAQ) Querétaro, Qro, Mexico.

35. Sheng Z. y Helm D: C., 1995; Conceptual models for earth fissuring in Las Vegas, Nevada, USA: Land subsidence. Proceedings of the Fifth International Symposium on Land subsidence, The Hague, October 1995. IAHS Pub. no. 234. p. 381-387.

36. Shimizu M., 1998; Application of a large-strain finite element model in predicting Land subsidence due to the variation of Ground-Water level: Borchers, J.W., ed., Land subsidence case studies and current research, Proceedings of the Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence: Association of Engineering Geologists, Special Publication no. 8, p. 239-247.

37. Terzaghi K., 1956; Theoretical soil mechanics; John Wiley and Sons Inc. New York.

38. Timoshenko, Stephen; Godier J.N.. McGraw-Hill. ed. Theory of elasticity.

39. 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 suelos, México, p. 67-74.

40. Trejo-Moedano A., 1989; Estratigrafía y propiedades mecánicas del suelo del valle de la zona urbana de Querétaro: Universidad autónoma de Querétaro, ISBN: 968-845-089-8, Querétaro Mex.

41. Trescott, P.C., 1975, Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground-water flow: U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438, p.32

42. Valdéz-Moreno G., Aguirre-Díaz G. y López-Martínez M., 1998; El volcán La Joya, Estados de Querétaro y Guanajuato – Un estrato volcán miocénico del cinturón volcánico mexicano: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.15, No. 2, 181-197

43. Zermeño M., Pacheco J., Mendoza E., Arzate J., Arroyo M., 2006; Fracturamiento y fallamiento de suelos, experiencias en la cd. de Aguascalientes, Ags. y Santiago de Querétaro, Qro. En memorias del XXIII Reunión Nacional de Mecánica Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. ISBN 968-5350-18-3 p. 793-801

44. Zúñiga F. R., Pacheco J. F., Guzmán-Speziale M., Aguirre-Díaz G. J., Espindola V. H., Nava E., 2003; The Sanfandila earthquake sequence of 1998, Querétaro, México: activation of an undocumented fault in the northern edge of central Trans-Mexican Belt: Tectonophysics 361, 229-238.