

Influencia de la Extracción del Agua en la Subsistencia y Agrietamiento

DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES

Dr. Mario E. Zermeño De León ¹, Ing. Rubén Esquivel Ramírez ²,
Ing. Antonio Hernández Navarro ², M. en Ing. Enrique Mendoza Otero ¹,
LAE. Javier Arellano Sánchez ²

INTRODUCCIÓN

El agrietamiento del suelo de Aguascalientes se detectó desde hace más de 25 años (Aranda y Aranda, 1985) y más recientemente se observó que la ciudad presenta un hundimiento (subsistencia) que alcanza valores de 12 cm por año (Esquivel *et al.*, 2004). Este fenómeno inicia como un hundimiento del terreno en la zona donde aparecerá la grieta, posteriormente las grietas de tensión y finalmente se presenta el fallamiento del suelo que sucede cuando se genera un desplazamiento entre los labios de la grieta. Para explicar el origen de este fenómeno se han discutido diferentes teorías, algunas asociadas con un tectonismo incipiente de la fosa o Graben de Aguascalientes y otras relacionadas con el abatimiento del nivel freático, causado por la sobreexplotación del acuífero del Valle de Aguascalientes.

Los problemas principales originados por el rápido crecimiento del agrietamiento del terreno de la ciudad son:

- Contaminación del acuífero por infiltración de aguas negras a través de las grietas.
- Pérdida de agua de riego por canales defectuosos o infiltración en las grietas.
- Daños en edificaciones y vialidades: 1491 viviendas y 32 edificios de educación presentan daño y cerca de 500 tramos de vialidades se ven afectados.

En este artículo se describe el proyecto UAA-INEGI para el monitoreo de la subsistencia del terreno de la ciudad de Aguascalientes y se presentan los resultados obtenidos durante 2003 y parte del 2004. El monitoreo se lleva a cabo mediante levantamientos con GPS sobre 60 monumentos que se establecieron en sitios de la mancha urbana más representativos del agrietamiento del terreno.

En este trabajo se hace ver que el abatimiento del nivel estático del acuífero del Valle de Aguascalientes provoca la subsistencia y el agrietamiento del terreno de la ciudad antes mencionada. Además, se está convirtiendo en un factor de sismicidad inducida.

¹ Universidad Autónoma de Aguascalientes, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Departamento de Construcción y Estructuras, mezerme@correo.uaa.mx, emendoza@correo.uaa.mx, Tel. (449) 910-84-56, Fax (449) 910-84-51.

² INEGI, Dirección General de Geografía, Sub. de Investigación Geodésica/Departamento de Procesamiento Geodésico, ruben.esquivel@inegi.gob.mx, antonio.hernandez@inegi.gob.mx, javier.arellano@inegi.gob.mx, Tel./Fax (449) 910-53-00, Ext. 5955

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es presentar el monitoreo de los desplazamientos horizontal y vertical de estaciones (monumentos) sobre la superficie de la zona urbana de Aguascalientes, para posteriormente, relacionarlos con los datos de extracción del agua del subsuelo. Los resultados que se presentan forman parte de la importante participación del INEGI en un proyecto interdisciplinario más general encabezado por la UAA en el que se realizan estudios de Geología, Geofísica, Geohidrología, Geotécnica y Estructuras.

ANTECEDENTES

A mediados de los años 80, investigadores de la UAA colocaron monumentos-testigos que permitieron monitorear siete sitios afectados por las grietas que aparecieron en la ciudad de Aguascalientes (Aranda y Aranda, 1985). En la década de los 90 se desarrollaron nuevos estudios, de los que se concluyó que la causa principal del problema es la sobreexplotación del acuífero del Valle de Aguascalientes y se obtuvo una perspectiva global de la sismicidad local producida por el agrietamiento del suelo (Lermo et al, 1996).

En marzo de 2003, la UAA reinició los levantamientos topográficos locales sobre los siete monumentos colocados en 1985. Los resultados de las mediciones del desplazamiento vertical entre los labios de la grieta en cada estación proporcionan una idea de la magnitud del hundimiento y su velocidad en algunas zonas de la ciudad en los últimos 19 años (Zermeño et al, 2004).

HIPÓTESIS

Actualmente existen más de 130 pozos ubicados exclusivamente en la zona urbana distribuidos de manera irregular y frecuentemente en posiciones que no favorecen la uniformidad en la extracción del agua, debido a la proximidad de varios de ellos. Este hecho aunado a que la extracción anual de agua del subsuelo en la entidad es casi el doble de la recarga del acuífero del Valle de Aguascalientes, provoca la consolidación gradual y no uniforme de la superficie del suelo de dicha ciudad.

En este trabajo se plantea como principal hipótesis que la extracción no uniforme del agua del subsuelo de Aguascalientes provoca una subsidencia no uniforme de la superficie de la zona urbana y se favorece su agrietamiento; así mismo se provoca una sismicidad inducida por la ruptura del contacto entre masas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proyecto de levantamientos geodésicos consiste en realizar series de mediciones con receptores GPS en 29 sitios, elegidos de manera conjunta por la UAA y el INEGI estratégicamente en algunas de las ubicaciones donde se desarrollan las grietas (Figura 1). En los sitios elegidos se colocaron pares de placas de aluminio de 9.5 cm de diámetro con la inscripción de INEGI, clave de la placa y fecha de establecimiento, a una distancia aproximada de 15 metros de forma perpendicular a la línea que describe la fractura del terreno (Figura 2). En dos sitios se colocó una placa extra.

A junio de 2004 se han efectuado siete series de mediciones bimensuales con equipo GPS de dos bandas de los modelos 4700 y 5700 de Trimble. Cada medición se realizó en modo estático con una ocupación de tres horas a un intervalo de registro de 15 segundos (Figura 3).

En el proceso de los vectores se utilizaron efemérides precisas, con las que se logran resultados de mejor calidad, comparados con los obtenidos con efemérides transmitidas. Los archivos de efemérides precisas son proporcionados por National Geodesic Survey (NGS) en su página de Internet [<http://www.ngs.noaa.gov>].

Se empleó el software Trimble Geomatics Office para el proceso y ajuste de los datos. Para diferenciar los puntos de monitoreo se utilizó la estación fija INEGI. Esta estación está instalada en el edificio sede del INEGI y experimenta un hundimiento constante por estar dentro de la zona de la ciudad que presenta subsidencia (Esquivel et. al, 2004). Esto obliga a obtener diferentes coordenadas actualizadas de INEGI para cada etapa de los levantamientos. Para ello, se realizaron procesos de datos GPS por semana, diferenciando los datos de INEG con las estaciones TAMP, TOL2 y CULI de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) utilizando coordenadas

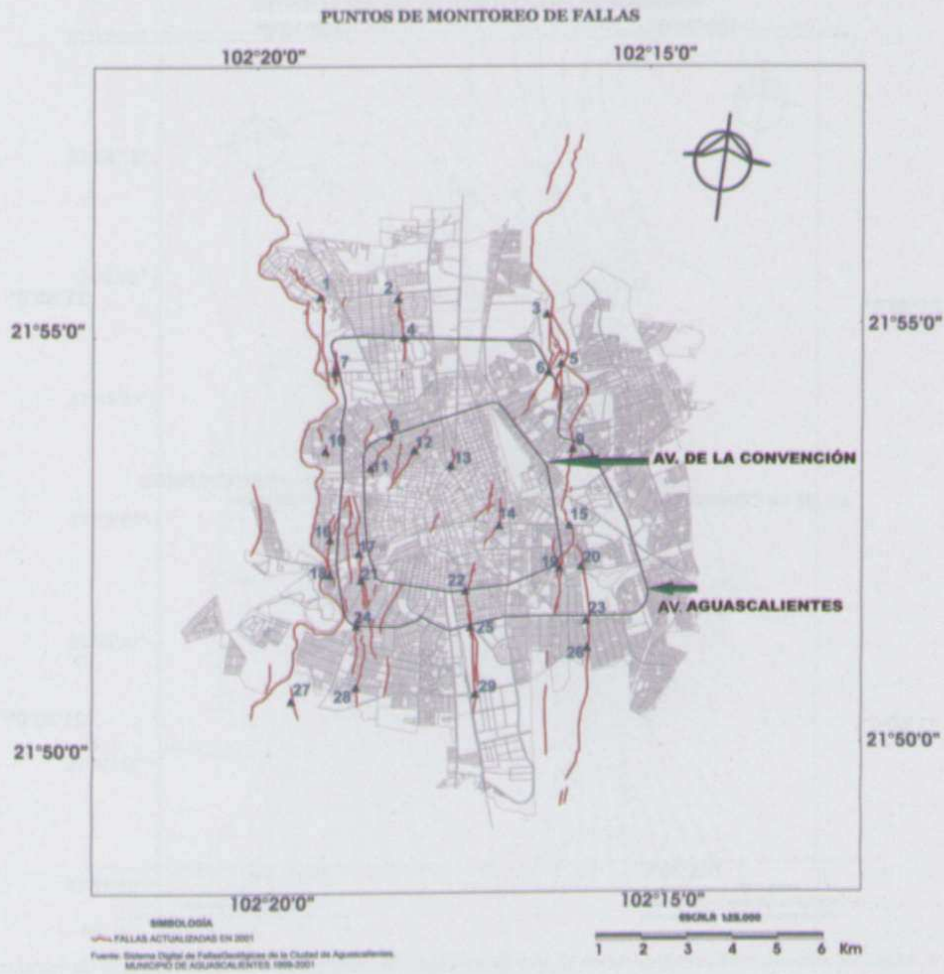


Figura 1. Posición y distribución de los sitios para medición con GPS de los desplazamientos horizontales y verticales de la superficie de la ciudad; en la mayor parte de las grietas el bloque que desciende es del lado poniente.



Figura 2. Detalle de colocación e identificación del monumento 25, consistente en una placa de aluminio de 9 cm. de diámetro, empotrada en guarnición, sobre el nivel de la calle, con fecha del 24 de marzo del 2003, sobre Av. Aguascalientes Sur.



Figura 3. Procedimiento de monitoreo de la estación 24 con GPS; la altura de la antena se aumentó en razón de los obstáculos que representan las edificaciones cercanas, las mediciones se hacen en modo estático con una ocupación de tres horas a un intervalo de registro de 15 segundos.

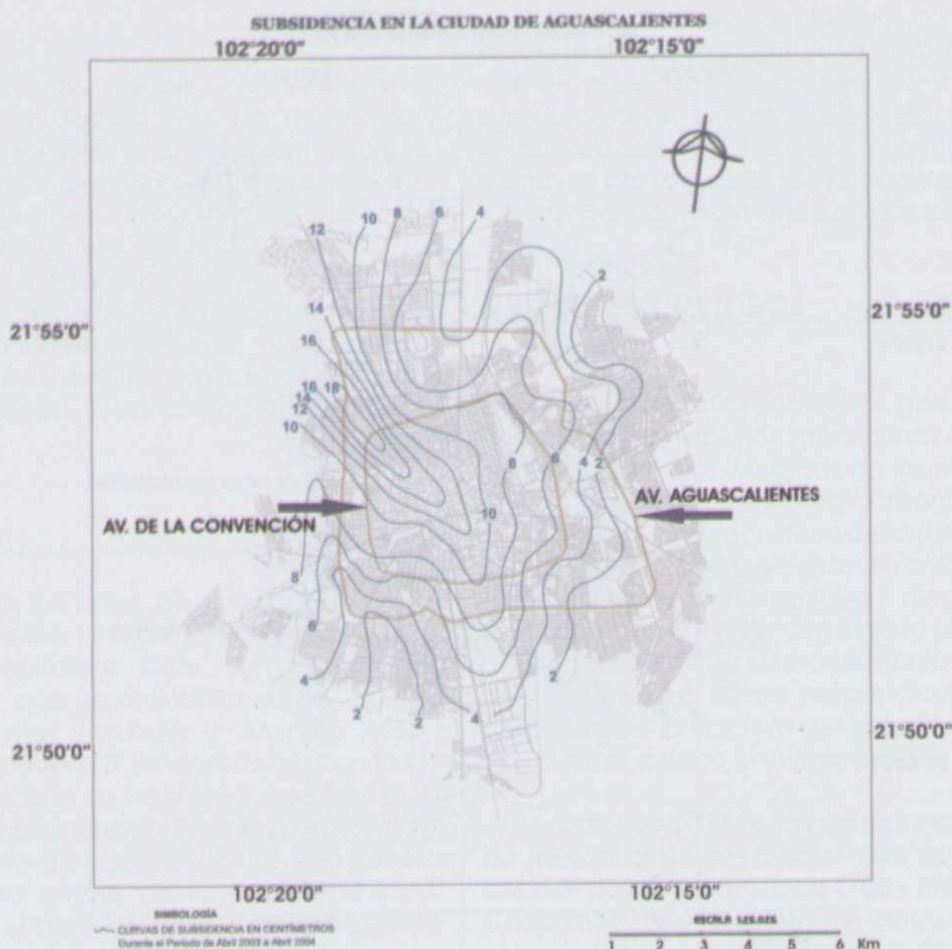


Figura 4. Mapa de subsidencia presentada en el año de estudio. Se observa una tendencia mayor de hundimiento hacia el poniente de la Ciudad, lo cual coincide con los valores de descenso del nivel freático hacia esta misma parte, tal como se observa en la Figura 5.

ITRF2000 época 2003. Las coordenadas obtenidas se aplicaron en los procesos de los puntos de monitoreo por cada semana en que se efectuaron las mediciones en sus diferentes etapas.

Los datos de extracción del agua del subsuelo se obtuvieron de la Comisión Ciudadana de Agua Potable y Alcantarillado del Municipio de Aguascalientes (CCAPAMA), a partir del monitoreo del volumen de agua extraído en los pozos ubicados en la zona urbana.

RESULTADOS

Con los hundimientos registrados en cada uno de los monumentos monitoreados, se elaboró un mapa de subsidencia (Figura 4). En el mapa se trazaron, mediante interpolación de valores, las curvas o líneas de igual hundimiento.

Las gráficas y los comparativos relativos a la posición de los monumentos en las siete etapas de medición no muestran tendencias de desplazamiento horizontal. La dispersión promedio de las posiciones horizontales de los puntos monitoreados es de 1.6 centímetros (0,00035" en latitud y 0,00039" en longitud).

Como complemento al estudio se obtuvieron mapas que muestran las cotas del nivel estático del acuífero del Valle de Aguascalientes. En la figura 5 se muestra el mapa de las cotas del nivel estático según los registros de los pozos en el periodo de 2000 a 2002. En este mapa se observa que la cota más baja es de 1 710 metros sobre el nivel del mar y se presenta al noreste de la ciudad. En esta gráfica se observa también una notable similitud entre las curvas de igual nivel freático en 2002 y las curvas de igual hundimiento obtenidas de los levantamientos geodésicos efectuados de

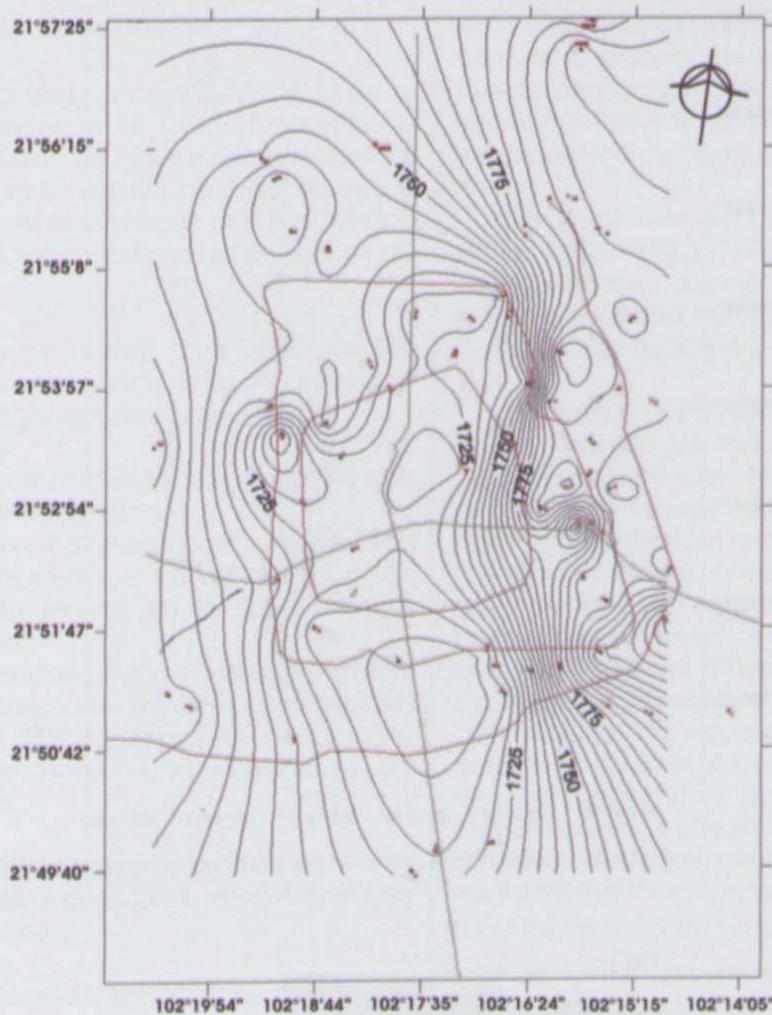


Figura 5. Mapa de las cotas del nivel freático del año 2002, obtenidas por interpolación numérica a partir de los datos de los pozos que opera CCAPAMA en la ciudad.

abril de 2003 a julio de 2004 que se muestran en la figura 4.

Los resultados anteriores indujeron a investigar sobre las cotas del nivel freático de años anteriores al 2000. Con los datos que se pudieron obtener se dibujaron también las curvas de igual nivel freático correspondientes a principios del año 1992 (Figura 6).

Como parte de un proyecto de investigación, a partir de 1993 se colocaron sismógrafos en diferentes puntos de la ciudad de Aguascalientes (Lermo *et. al.*, 1996). Esto permitió registrar tres sismos locales, el 30 de noviembre de 1993, 11 de enero y 11 de junio de 1994, con epicentros en la zona urbana de la ciudad. En la figura 7 se muestran la distribución de los sismógrafos y la

ubicación de los epicentros de los sismos locales registrados.

De acuerdo con la figura 6, la extracción del agua subterránea se concentró de manera intensa hacia el Oriente de la ciudad, lo cual coincide con la ubicación de uno de los epicentros locales en esta misma parte de la ciudad (Figura 7).

DISCUSIÓN

De las figuras 4, 5 y 6 se puede interpretar que existen diferentes zonas de la ciudad que han estado sometidas a variaciones de esfuerzos, donde al desaparecer la presión de poro, el esfuerzo total es equilibrado por el esfuerzo efectivo o ínter-granular. Esto provoca una

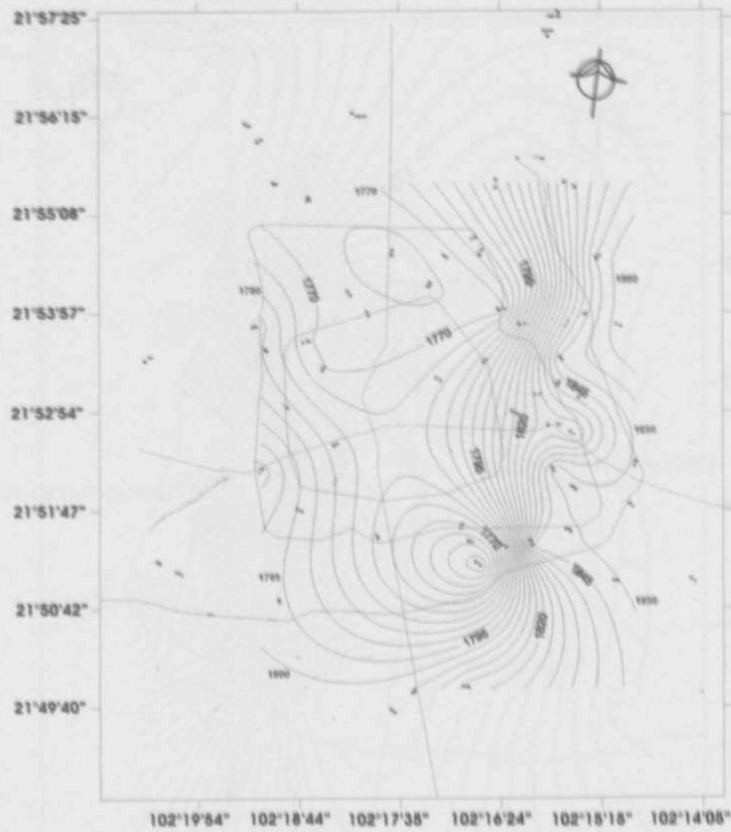


Figura 6. Mapa de las cotas del nivel freático del año 1992, obtenidas por interpolación numérica a partir de los datos de los pozos que opera CCAPAMA en la Ciudad.

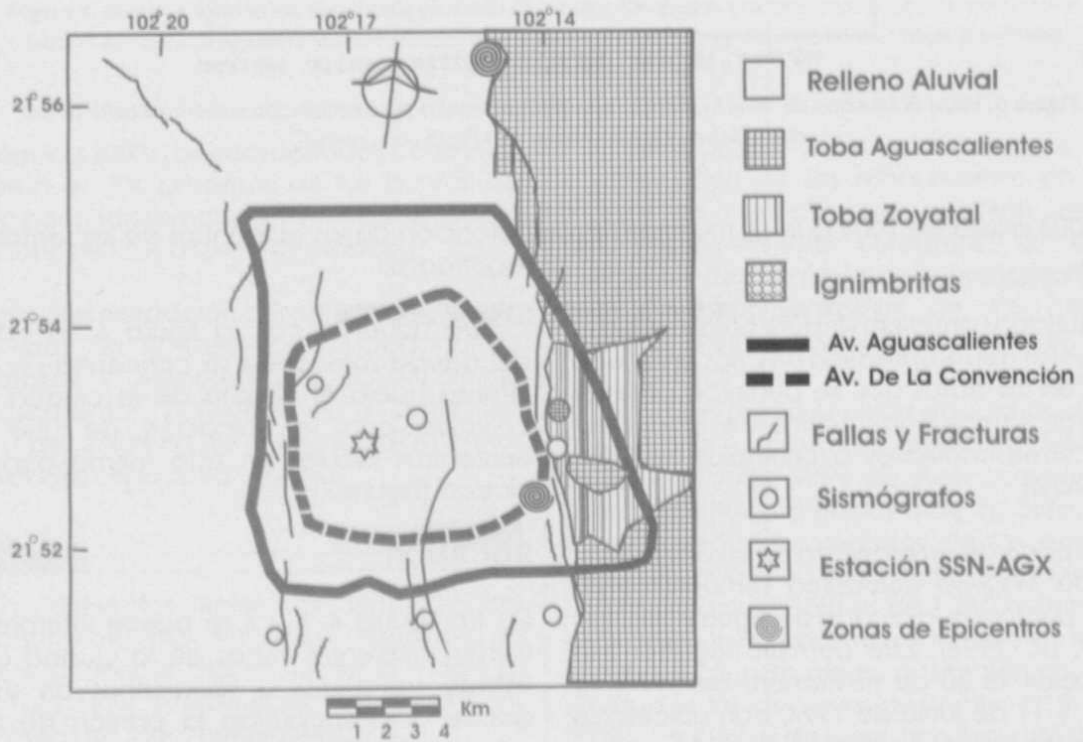


Figura 7. Localización de epicentros sísmicos durante 1993-94 (Lermo *et. al.*, 1996).

disminución de la relación de vacíos en la masa de suelo favoreciendo su consolidación.

Las observaciones semi-empíricas para el análisis de la subsidencia se basan fundamentalmente en la búsqueda de alguna relación entre los desplazamientos verticales del nivel del terreno a través del tiempo, el abatimiento del nivel freático y los espesores de suelo compresible (Arroyo *et. al.*, 2004)

Actualmente se sabe que cuando se cumplen las siguientes condiciones, se presentan la subsidencia y agrietamiento del suelo:

- a) Que exista un basamento incompresible con importantes irregularidades.
- b) Que exista un abatimiento del nivel freático importante (superior a los 30 m), es decir, una variación brusca en los abatimientos piezométricos.
- c) Que por lo menos en algún estrato del material de relleno (suelo o sedimentos compresibles de más de 30 m) sobre el basamento incompresible posea una plasticidad de media a baja.

De acuerdo con los datos recabados hasta ahora, el Valle de Aguascalientes cumple con estas tres condiciones.

De las mediciones llevadas a cabo con GPS en la superficie de la zona urbana de Aguascalientes durante el año 2003 y parte del 2004 se observa que el hundimiento absoluto observado en los puntos de monitoreo varía desde cero en el sureste de la ciudad, hasta 19 centímetros en el noreste del área de estudio (zona donde se localiza el templo de San Felipe, el cual es un edificio representativo de los efectos del agrietamiento del suelo, en razón de los daños que ha sufrido su estructura). Se estima un error de ± 1 centímetro en los valores de hundimiento mostrados en la figura 4.

De lo anterior se deduce que la operación actual de extracción del agua del acuífero del Valle de Aguascalientes induce una distribución no uniforme de asentamientos en la superficie, lo cual puede provocar en un futuro próximo la aparición de nuevas grietas del suelo. Sin embargo, se necesitarían datos más precisos, tales como la evolución con el tiempo de los abatimientos de los diferentes pozos, para poder

concluir sobre los efectos causados localmente en la vecindad de los pozos; de antemano y con base en lo presentado en las figuras anteriores se puede pensar que efectivamente existe alguna relación entre este abatimiento del nivel freático y la aparición de agrietamientos.

De igual manera, la sismicidad registrada en los años 1993 y 1994 en la zona urbana de Aguascalientes (Lermo *et. al.*, 1994) parece estar relacionada con los bombeos del subsuelo durante ese mismo período.

En cuanto al estudio de los desplazamientos horizontales de los monumentos, no se logran observar tendencias hacia una dirección en especial. Se ha propuesto una teoría (teoría de pérdida volumétrica) relativa al comportamiento mecánico del suelo ante el excesivo abatimiento del nivel freático que determina la existencia de desplazamientos horizontales en el suelo que son de mayor magnitud en los hombros del Graben de Aguascalientes (Rojas *et. al.*, 2004). La acumulación de esfuerzos producidos por este fenómeno podrían haber provocado la aparición de una grieta con abertura de más de 50 centímetros al sureste de la ciudad en septiembre de 2003, esfuerzos que, se han observado, se traducen en repentinos desplazamientos de bloques de suelo en temporadas de lluvias.

CONCLUSIONES

1. Del análisis de la componente vertical de los levantamientos con GPS de los monumentos de referencia, se observa un hundimiento considerable en la mayor parte de la ciudad, que parece estar relacionado directamente con las variaciones del nivel freático producidos por la sobreexplotación del acuífero de la zona urbana de Aguascalientes.
2. Durante el año que duró el estudio, no se observaron movimientos horizontales apreciables en los levantamientos con GPS de los 60 puntos de referencia.
3. Se debe dar seguimiento a la relación que existe entre las variaciones en los volúmenes locales de extracción de agua en los pozos y las variaciones en la subsidencia que éstas

provocan, ya que, según los resultados aquí presentados, la relación parece ser muy estrecha.

4. Relacionando la subsidencia con el tiempo, los niveles piezométricos y/o el espesor de los

estratos compresibles, se podría hacer una interpolación de datos a futuro y así tener idea del máximo hundimiento esperado del suelo y del máximo desplazamiento esperado entre los labios de la grieta.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aranda Gómez, J.M. y Aranda Gómez, J.J., *Análisis del agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes*, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México, 1985.
2. Arroyo Contreras, M., Zermeño De León, M.E., Castañeda Alvarado, J.A., *El Agrietamiento en Aguascalientes: Causas y Efectos*, Universidad Autónoma de Aguascalientes, México, 2004, 227 pp.
3. Esquivel Ramírez, R., Zermeño De León, M.E., Arellano Sánchez, J., *Métodos GPS para determinar subsidencias, el caso de Aguascalientes*, "8º Congreso Nacional e Internacional de Ingeniería Topográfica", Colegio de Ingenieros Topógrafos, A.C. Morelia, Michoacán, 3 al 5 de Noviembre 2004,
4. Lermo, J., Nieto Obregón, J. and Zermeño, M.E., *Faults and fractures in the valley of Aguascalientes. Preliminary microzonification: Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*, Elsevier Scienc Ltd. Ed., 1996.
5. Rojas, E., Arzate, A., y Arroyo, M., *Predicción de las Zonas de Agrietamiento por Pérdida Volumétrica*, "III Simposio de Ingeniería Civil, Sistemas Acuíferos y Fallamiento de Suelos, Colegio de Ingenieros Civiles de Aguascalientes", del 18 al 20 de marzo, 2004.
6. Zermeño De León, M.E., Mendoza Otero, E., Calvillo Silva, G., *"Medición del hundimiento y modelo para estudiar el agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes"*, *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 35-40, (31): Julio-Diciembre, 2004.