

Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México

Jesús Pacheco-Martínez^{1,2,*} y Jorge Arzate-Flores³

¹ Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla,
Blvd. Villas del Mesón s/n, 76230 Querétaro, Qro.

² Estudios y Proyectos de Ingeniería, Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción, Universidad Autónoma de Aguascalientes,
Campus Universitario Norte, Edificio 108, Av. Universidad 940, Fracc. Campestre, 20100 Aguascalientes, Ags. México.

³ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla,
Blvd. Villas del Mesón s/n, 76230 Querétaro, Qro.

* pachecojm@geociencias.unam.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta una metodología nueva para determinar las deformaciones y esfuerzos que se producen durante el proceso de subsidencia en un acuífero que está constituido por varias capas de diferentes materiales granulares no consolidados, cuyas propiedades hidráulicas son tales que el incremento de esfuerzos efectivos no depende del tiempo y se produce simultáneamente con el abatimiento del nivel del agua en el subsuelo. Para este propósito se derivan expresiones para determinar el incremento de esfuerzos efectivos a partir de relaciones volumétricas y gravimétricas de la masa de suelo, lo cual permite determinar la distribución de los esfuerzos y deformaciones, tanto en la zona drenada como en la zona por debajo del nivel del agua. La metodología es útil para la simulación del fenómeno mediante el análisis de un sistema equivalente, en el cual se considera el efecto de un incremento aparente en el peso volumétrico sobre las partículas sólidas del suelo asociado al aumento de esfuerzos efectivo. El modelo se aplica a una sección geológica del acuífero del Valle de Querétaro obtenida a partir de mediciones gravimétricas y calibradas con registros litológicos de pozos. A partir de este proceso se deducen los espesores de los diferentes estratos, incluyendo del cuerpo acuífero, así como los tipos de materiales que constituyen la secuencia aluvial y lacustre del relleno en la zona de estudio. Se hace un análisis de esfuerzos y deformaciones de esta sección utilizando elementos finitos, considerando el efecto generado por la extracción de agua del acuífero libre del valle. Una de las condiciones de frontera impuesta al modelo es el de un abatimiento total de la misma magnitud del que se observa actualmente en el sistema acuífero del valle (~150 m). Los resultados se comparan con observaciones de campo de los hundimientos registrados y de las zonas donde se han generado agrietamientos.

Palabras clave: subsidencia, gravimetría, esfuerzos efectivos, modelo multicapa, valle de Querétaro, México.

ABSTRACT

In this work we present a new methodology to evaluate the stress and strain produced during the process of subsidence within a multi-layered aquifer system with different granular materials. The hydraulic properties of the materials are such that the increase of the effective stress is assumed to be time independent and to occur simultaneously to the groundwater drop. For this purpose, we derive expressions to estimate the increase of effective stress from the volumetric and gravimetric relation for the soil mass, which allows us to estimate the strain distribution and deformations within the drained soil mass as well as below the water level. The methodology is useful to simulate the phenomenon of subsidence by means of the analysis of an equivalent system, which consist of the evaluation of the effect of an apparent increase of the volumetric weight associated with the increase of the effective stress. The model is applied to a geological section of the free aquifer of the Queretaro valley deduced from gravity

measurements and calibrated with lithology logs from available wells. This led us to define the aquifer thickness and the distribution of the different material types within it. Then, by using finite elements, we made a stress and strain analysis on the section of the effect of water withdrawal of the aquifer. A boundary condition imposed to the system is the actual average level of drawdown, which is about 150 m. The results are compared with observed subsidence and soil failure along the modeled section.

Key words: subsidence, gravimetry, effective stress, multilayer model, Querétaro valley, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La extracción continua de agua del subsuelo, cuando éste está constituido por material granular poroso (o meteorizado, tal como un basalto muy fracturado), tiene como consecuencia la generación de hundimientos graduales del suelo por consolidación. Debido a que la magnitud de los hundimientos puede ser de sólo unos cuantos centímetros por año, éstos son casi imperceptibles, sin embargo al cabo de algunos pocos años los asentamientos tienden a generar problemas tales como cambios en el drenaje natural del área que se hunde. Cuando la base del acuífero es irregular se pueden presentar, asociados a los hundimientos, fallamientos del suelo en la forma de grietas o desplazamientos verticales del terreno, los cuales afectan frecuentemente todo tipo de infraestructura civil debido a que este fenómeno es más notorio en las áreas urbanas.

Los agrietamientos superficiales generados por hundimientos diferenciales asociados a irregularidades en el lecho rocoso de sistemas acuíferos han sido estudiados por diversos autores (Holzer, 1984; Suleiman, 1994; Bell y Helm, 1998; Rojas *et al.*, 2002). La teoría de la consolidación unidimensional formulada por Terzaghi (1956), con la cual se introdujo el concepto de esfuerzos efectivos, ha sido el punto de partida para trabajos de cálculo de hundimientos. Terzaghi dedujo una expresión que relaciona la presión de poro, la profundidad y el tiempo, la cual permite calcular la distribución de presiones a cualquier profundidad del medio saturado y a cualquier tiempo durante el proceso de consolidación (ver Figura 1). Aunque la teoría de consolidación unidimensional se desarrolló para otros propósitos, ha sido empleada en problemas de hundimientos por extracción de agua (Rivera *et al.*, 1991; Mishra *et al.*, 1993; Shimizu, 1998).

Una de las hipótesis principales de la teoría unidimensional de consolidación es que la disminución del volumen de la masa de suelo provocada por la extracción de agua del subsuelo es igual al volumen drenado. Esto se cumple sólo mientras la masa de suelo tenga la condición de totalmente saturada. Cuando en la masa de suelo existen dos estados diferentes, uno saturado y otro parcialmente saturado, la consideración principal ya no se cumple y por lo tanto no se puede aplicar la teoría. En este trabajo tratamos el problema de las deformaciones y esfuerzos que se producen en la masa de suelo que conforma el sistema acuífero, cuya permeabilidad es tal que la transferencia de esfuerzos del agua al suelo se produce simultáneamente con el descenso

del nivel del agua y en donde se produce una zona de suelo parcialmente saturado al drenar el acuífero.

ESFUERZO EFECTIVO, PESO VOLUMÉTRICO APARENTE E INCREMENTO APARENTE EN EL PESO VOLUMÉTRICO

El concepto de esfuerzo efectivo deducido por Terzagui (1956), fue formulado a partir de la consolidación de un estrato y considerando que la disminución del volumen de la masa de suelo es igual al volumen de agua drenada por efecto de un gradiente de presiones en el agua de la masa de suelo. Dicho gradiente es producido por una carga impuesta desde la superficie sobre un medio confinado donde se pueden desarrollar presiones en exceso de la presión hidrostática. El concepto de esfuerzos efectivos clásico describe de forma satisfactoria el proceso del drenado de una capa arcillosa (acuitardo) intercalada en un

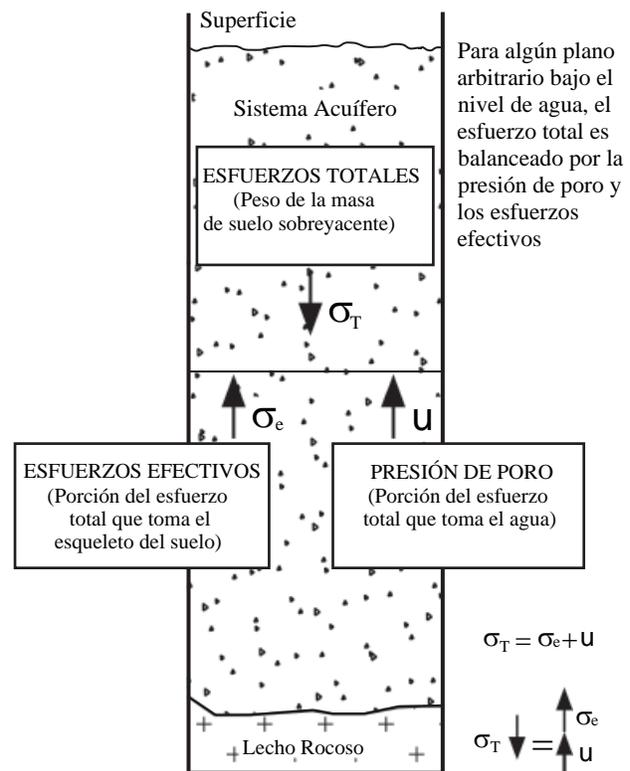


Figura 1. Esquema del principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi.

acuífero permeable cuando se origina un descenso en el nivel piezométrico del acuífero (Poland, 1984). En general, en el proceso de drenado de un acuífero granular libre no se presentan las mismas condiciones de esfuerzos que en un sistema confinado. Durante el proceso de drenado de un acuífero libre, como en el caso del valle de Querétaro, la masa de suelo se deforma por efecto de su propio peso ante la pérdida de sustentación hidráulica y no por efecto de una carga concentrada en la superficie (Figura 2). En este caso, las fuerzas más relevantes sobre las partículas sólidas son la gravedad y la flotación hidráulica. En estas condiciones la masa de suelo se deformará conforme descienda el nivel de agua.

Es posible derivar expresiones que describan la distribución de esfuerzos en una masa de suelo durante el proceso de subsidencia para ser aplicadas al caso de un acuífero libre que inicialmente se encuentra en equilibrio hidrostático. Para este propósito se hacen las siguientes suposiciones: a) el agua y las partículas sólidas del subsuelo se consideran indeformables, lo cual implica que la deformación de la masa de suelo es consecuencia de una disminución en la relación de vacíos; b) cada estrato del acuífero está constituido por material poroso continuo, con los poros y los sólidos distribuidos homogéneamente, es decir, la relación de vacíos es constante para cada estrato; c) las fuerzas que actúan sobre el sistema son la gravitacional y la generada por el efecto de flotación de las partículas sólidas. Las fuerzas capilares que pueden presentarse en la zona parcialmente saturada no se consideran en el modelo, ni tampoco las fuerzas de cohesión de las partículas; d) la superficie que limita a la masa saturada de la que está parcialmente saturada coincide con el nivel estático del acuífero; e) El abatimiento del nivel del agua ocurre simultáneamente a los hundimientos de suelo.

A partir de estas suposiciones se obtienen expresiones (ver Apéndice) para estimar los desplazamientos y deformaciones verticales y horizontales, así como la distribución de esfuerzos principales en la masa de suelo, producidos por el drenado del acuífero, los cuales se utilizan más adelante para analizar una sección W-E del valle de Querétaro.

HUNDIMIENTOS DE SUELO EN EL VALLE DE QUERÉTARO

Los hundimientos de suelo en el Valle de Querétaro se han generalizado a tal grado que en la actualidad se tiene conocimiento de tres diferentes familias de agrietamientos (Figura 3). Aunque no existen datos precisos del área afectada por la subsidencia, se estima que es de alrededor de 100 km² a partir de la distribución de los agrietamientos que se observan en la superficie. En algunos trabajos sobre el valle (Trejo-Moedano y Martínez-Baini, 1991; Arroyo *et al.*, 2002; Aguirre-Díaz *et al.*, 2000) se describe cualitativamente el fenómeno. En otros trabajos se ha propuesto una metodología para predecir espacialmente zonas donde

ocurren los mayores hundimientos y con mayor potencial de que ocurran agrietamientos (*e.g.*, Rojas *et al.*, 2002), sin embargo en estos trabajos se considera al sistema acuífero como una capa de material homogéneo ubicada sobre un lecho rocoso sin irregularidades.

A pesar de que los modelos de subsidencia implementados para la periferia del valle arrojan resultados aceptables considerando un acuífero homogéneo (Pacheco *et al.*, 2006), es necesario incorporar la complejidad estratigráfica del valle para evaluar la influencia que ésta tiene en el fenómeno de compactación bajo un régimen de extracción parcial. Es por ello que para llevar a cabo una simulación más realista de los hundimientos es necesario conocer la distribución lateral y a profundidad de los diferentes materiales que constituyen el relleno.

ESTRATIGRAFÍA DEL RELLENO DEL VALLE

La secuencia de rellenos en el valle es muy heterogénea, sin embargo, a partir de registros litológicos de pozos, ha sido posible identificar tres paquetes de relleno bien diferenciados (CNA, 2000; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Arroyo *et al.*, 2002). Así, en la parte central del valle se identifica un paquete de rellenos aluviales del cuaternario (Q Al) compuesto por arcilla, limo y arena fina que se presenta en espesores variables de hasta 50 metros. Debajo de los rellenos del Cuaternario se encuentra una secuencia de depósitos fluviales, aluviales, lacustres (principalmente arcilla, arena y grava), así como depósitos de piroclastos no consolidados (Tp Py Lac) constituidos por tobas y depósitos volcánicos de caída. A este paquete sedimentario se le ubica en el Plioceno (Carreón-Freyre *et al.*, 2005). El cuerpo del acuífero granular superficial está formado por estos dos paquetes de sedimentos de permeabilidad media a alta (CNA, 2000; Arroyo *et al.*, 2002) de donde se ha drenado la mayor parte del volumen del agua que se ha extraído del acuífero del valle de Querétaro (Álvarez-Manilla, 1999). Debajo de este relleno se encuentra un derrame de lava de composición basáltica y andesítica (Tmt AB), el cual forma el lecho rocoso del acuífero superficial. De acuerdo con los registros litológicos de pozos, este derrame de lava se encuentra presente en todo el valle de Querétaro. Alaniz-Álvarez *et al.* (2001) asignan a este estrato rocoso una antigüedad del Mioceno tardío y Carreón-Freyre *et al.* (2005) identifica este estrato como la secuencia volcánica que divide las dos principales secuencias fluvio-lacustres terciarias del valle de Querétaro. Al derrame basáltico-andesítico le subyace una secuencia de relleno compuesta por sedimentos lacustres y piroclastos del Oligoceno y del Mioceno (To-Tm Py Lac) medianamente consolidados. Debajo de estos sedimentos se encuentra una secuencia de rocas volcánicas Terciarias (Tp AB) que yacen sobre una unidad de calizas y areniscas (Ki Cz Ar) del Cretácico Inferior (CNA, 2000; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Arroyo *et al.*, 2002; Carreón-Freyre *et al.*, 2005). La Figura 4 muestra un corte estratigráfico simplificado de

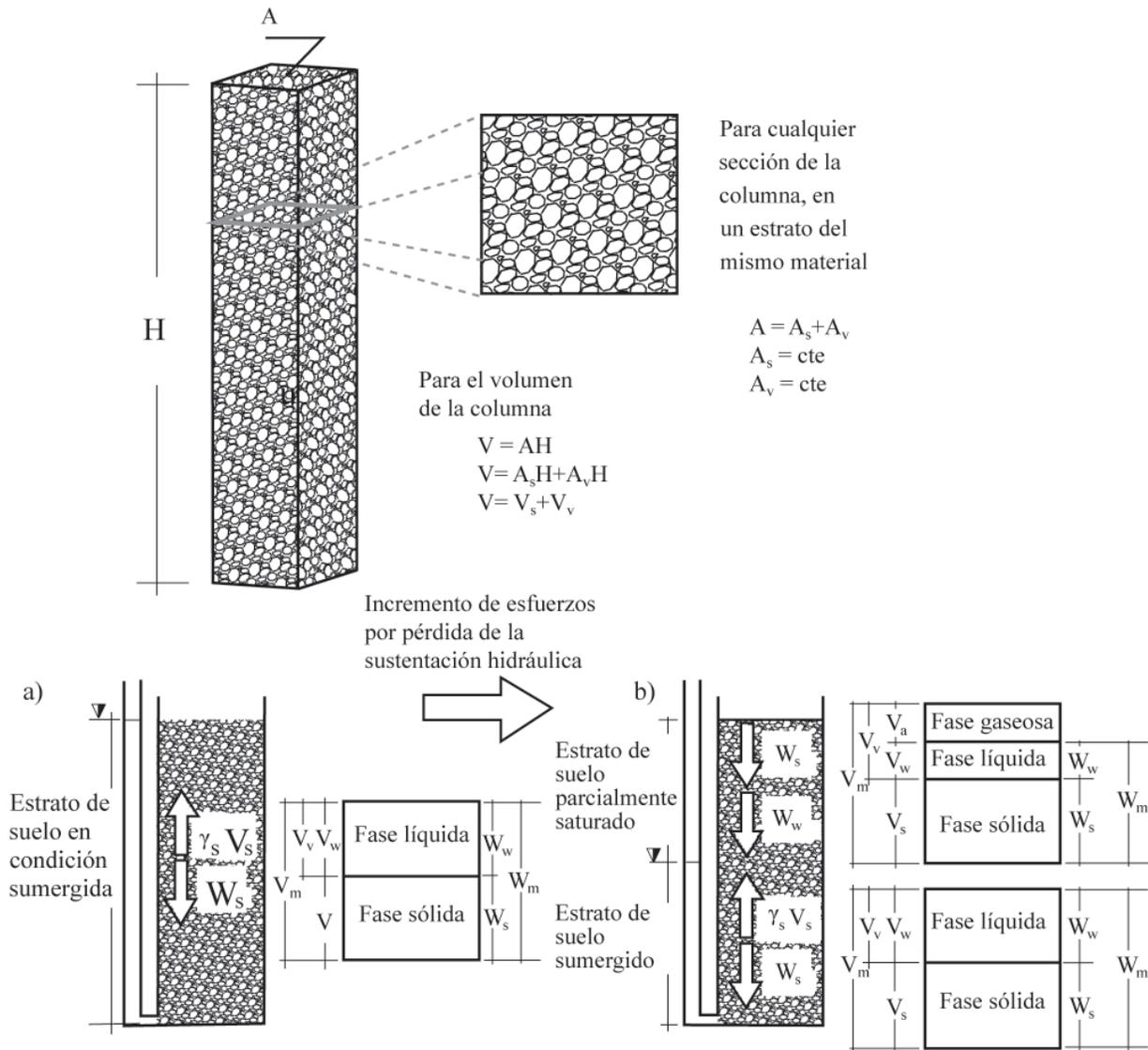


Figura 2. Columna de suelo con los poros homogéneamente distribuidos, en la cual el área de sólidos (A_s) y el área de vacíos (A_v) son constantes para cualquier sección transversal a lo largo de la columna. V_s y V_v son los volúmenes de sólidos y de vacíos, respectivamente, W_s y W_w son los pesos de sólidos y de agua, respectivamente y γ_w es el peso volumétrico del agua.

la secuencia que constituye el acuífero, el cual fue utilizado para el modelado de la sección interpretada.

ANÁLISIS MULTICAPA: SECCIÓN CASTILLO-ALAMEDA

A pesar de la disponibilidad de algunos pozos con registro litológico, no es frecuente contar con un número suficiente de registros que permita obtener el detalle necesario para conocer la distribución lateral y los espesores de los diferentes materiales que constituyen el relleno del valle. Sin embargo, para este propósito se emplean las técnicas geofísicas que, calibradas con información litológica de pozos, constituyen una herramienta poderosa para determinar la estructura del subsuelo. Uno de los métodos geofísicos que

ha probado ser muy útil en la zona del valle de Querétaro es el gravimétrico. El levantamiento gravimétrico fue realizado utilizando un gravímetro CG-3 Scintrex, cuya precisión es mayor a 0.1 mGal. Los datos fueron procesados aplicando todas las correcciones estándar de un levantamiento terrestre, incluyendo la corrección por el efecto de la topografía del terreno. La corrección fue llevada a cabo utilizando el modelo digital de terreno de la carta Querétaro a escala 1:50,000 del INEGI y un software desarrollado para este propósito (Pacheco-Martínez, 2007). A la carta de gravedad de Bouguer completa se le ajustó una superficie de 2° grado para extraer la carta de anomalía residual (Figura 3) a partir de la sustracción de la anomalía regional del valle. La Figura 5 muestra el modelo bidimensional del subsuelo a lo largo del perfil Castillo-Alameda obtenido a partir del algoritmo de Talwani *et al.* (1959). El control topográfico

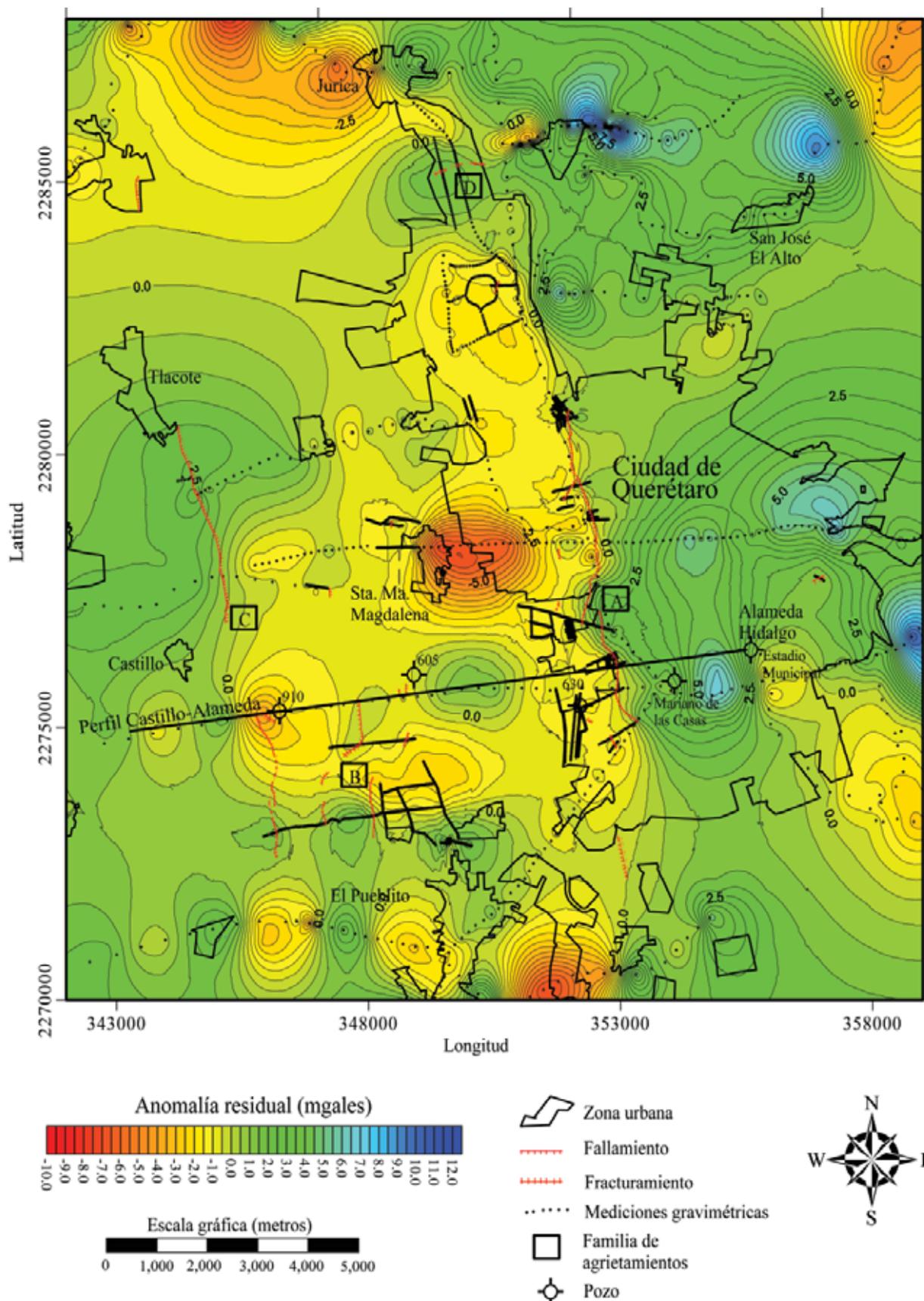


Figura 3. Zonas de agrietamientos superficiales observados en diferentes partes del valle de Querétaro superpuestas a la anomalía gravimétrica residual. La línea W-E representa la ubicación del perfil modelado.

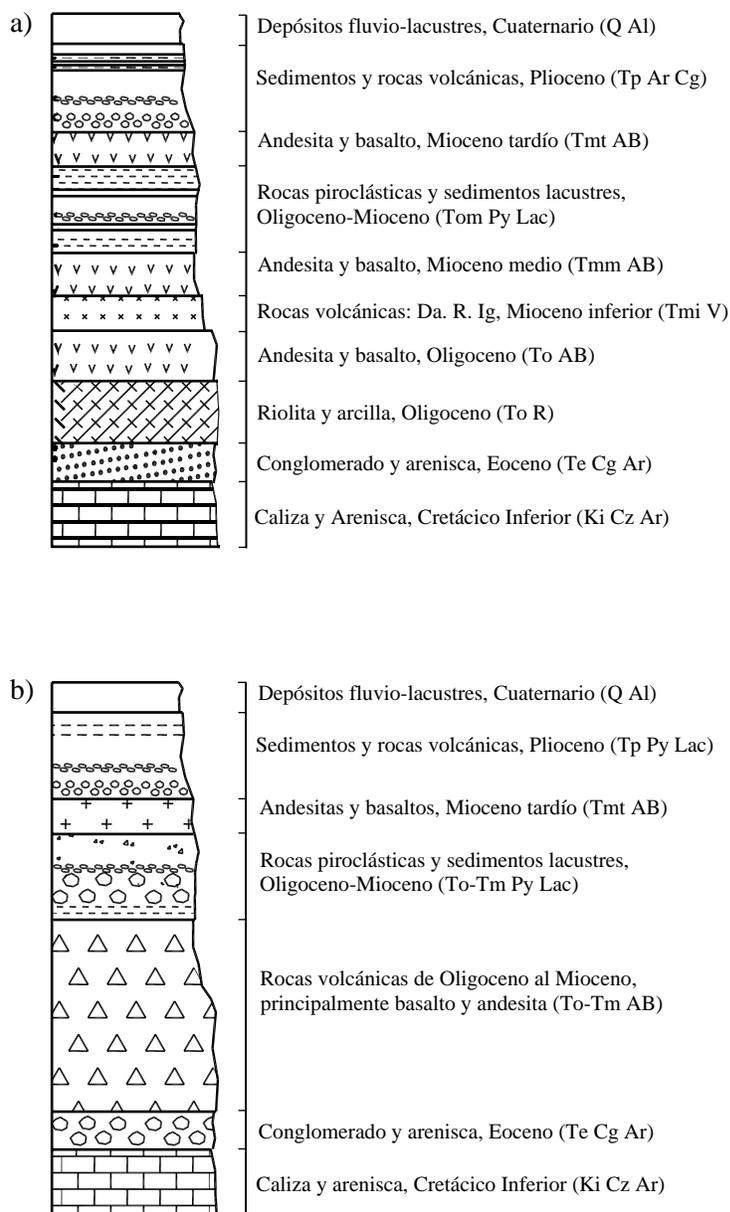


Figura 4. a: Columna estratigráfica reportada por Carreón-Freyre *et al.* (2005) para el valle de Querétaro; b: simplificación de la columna geológica para fines del modelado de datos gravimétricos y de simulación de la subsidencia del valle de Querétaro.

a lo largo del perfil interpretado fue realizado utilizando una estación total marca Sokkia modelo SET-610 cuyo error máximo es de 2 cm/km con un cambio de estación. En la misma sección se muestra la ubicación de los pozos (910, 605, 630, Mariano de las Casas y Estadio Municipal), cuya información litológica fue utilizada para constreñir la geometría de la sección modelada del acuífero. En la parte superior de la figura se muestra el ajuste de la curva teórica con la curva de campo, así como la ubicación de los pozos utilizados para calibrar el modelo. Las diferentes capas de la sección modelada forman parte del cuerpo del acuífero que fue sometido a un análisis de deformaciones y esfuerzos realizado simulando un abatimiento del nivel del agua.

Para el análisis de deformación del acuífero, las unidades litológicas de rocas volcánicas debajo de los rellenos del Oligoceno-Mioceno (To-Tm Py Lac) son consideradas indeformables, y el contacto entre éstas y los sedimentos se considera el límite de la sección multicapa. Para la simulación del proceso de subsidencia se consideró un abatimiento parcial, tal que los sedimentos por encima de la unidad Tmt AB son la principal fuente de abastecimiento. La Tabla 1 muestra el incremento aparente en el peso volumétrico de los paquetes de sedimentos drenados calculados. La determinación del incremento aparente en el peso volumétrico para los paquetes de sedimentos drenados se llevó a cabo a partir de la Ecuación 31 (Apéndice). Los datos

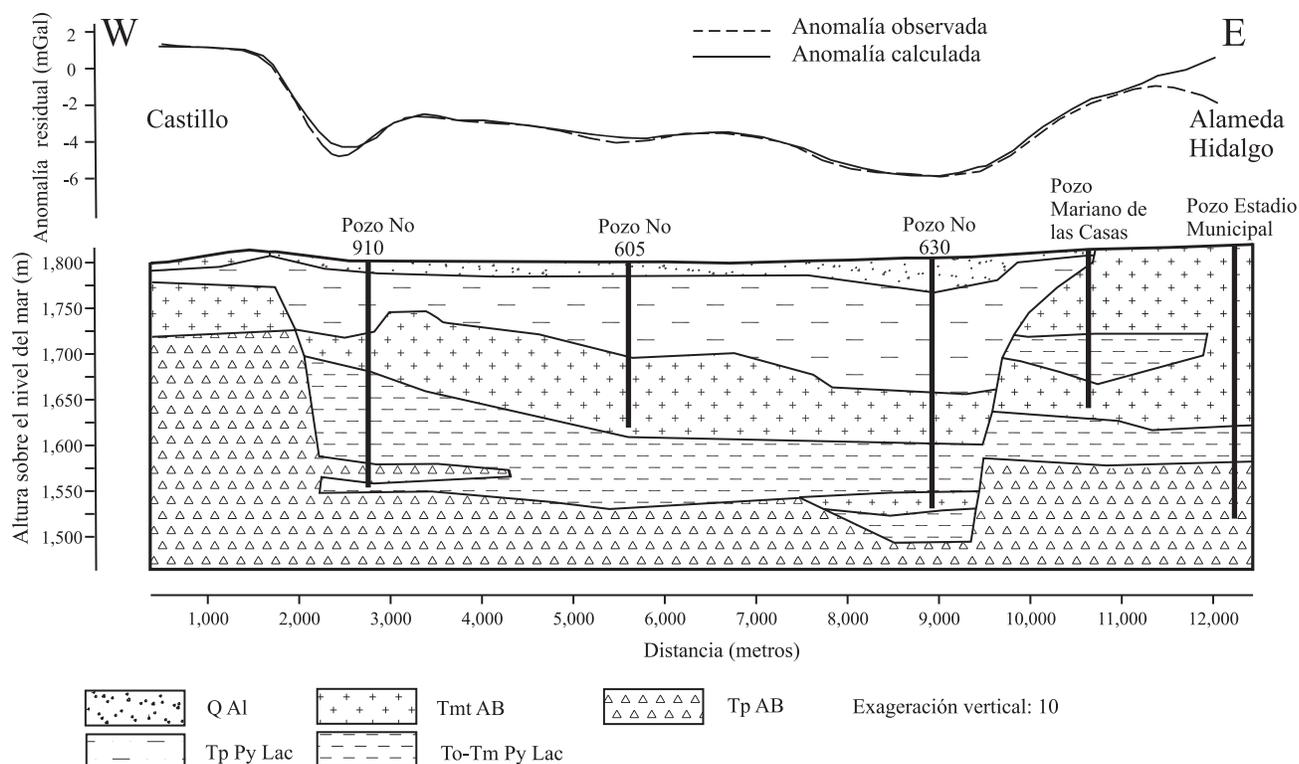


Figura 5. Modelo geológico de una sección del acuífero del valle de Querétaro interpretada a partir de datos gravimétricos y litología de pozos.

necesarios para el cálculo fueron tomados de diferentes fuentes (Trejo-Moedano, 1989; UAQ, 1998; Hunt, 1986). Por otro lado, el módulo elástico dinámico de los rellenos Q AI y Tp Py Lac fue calculado de acuerdo con Sheriff y Geldart (1991), a partir de la velocidad de propagación de las ondas sísmicas reportadas y medidas para este propósito. El módulo elástico estático fue calculado de acuerdo a la relación que existe (Yu, 2004) entre los módulos elásticos dinámico y estático. La Tabla 2 muestra los valores de propagación de la onda sísmica y de módulo elástico dinámico

y estático calculados.

Para la simulación con elementos finitos se utilizó la sección modelada Castillo-Alameda (Figura 5). Para este propósito se considera que la acción causante de la deformación de los rellenos sedimentarios es el incremento aparente en el peso volumétrico por efecto de la disminución del nivel estático del agua. Las propiedades esfuerzo-deformación para el material fueron tomadas de la Tabla 2. En este análisis de esfuerzos y deformaciones durante el proceso de subsidencia, se considera que el sistema está

Tabla 1. Determinación del incremento aparente en el peso volumétrico para los paquetes de sedimentos drenados de acuerdo a la Ecuación 13. Los datos para el cálculo fueron tomados de: ¹Trejo-Moedano (1989); ²Álvarez-Manilla (1999) y Hunt (1986) (datos para materiales similares). γ_s : peso volumétrico de los sólidos de suelo; γ_w : peso volumétrico del agua; w : humedad del suelo drenado expresado en forma decimal; γ_1 , γ_2 y $\Delta\gamma$ ver ecuaciones 8, 16 y 31 respectivamente.

Material	γ_s (kg/m ³)	γ_w (kg/m ³)	w	γ_1 (kg/m ³)	γ_2 (kg/m ³)	$\Delta\gamma$ (kg/m ³)
Depósitos lacustres y aluviales no consolidados (Q AI) ¹	2,471	1,000	0.26	1,471	3,113	1,642
Depósitos fluviales, aluviales y lacustres de piroclastos no consolidados (Tp Py Lac) ²	2,600	1,000	0.37	1,600	3,562	1,962
Andesitas y Basaltos (Tm AB) ³	—	—	—	—	—	0
Sedimentos lacustres y clastos volcánicos medianamente consolidados (To-Tm Py Lac) ³	—	—	—	—	—	0
Andesitas y Basaltos (Tp AB) ³	—	—	—	—	—	0

drenado sobre los estratos.

El análisis de las zonas de subsidencia estimadas sugiere que los fallamientos de suelo en el Valle de Querétaro se generan en los bordes de estas zonas y son inducidos por hundimientos diferenciales que se presentan en estos puntos. En el proceso de subsidencia no sólo se presentan desplazamientos y deformaciones verticales. La Figura 8 muestra los desplazamientos horizontales estimados que las partículas del suelo experimentan cuando el nivel del agua se abate. Los tonos azules y los valores negativos indican que las partículas se mueven hacia la izquierda, mientras que los tonos rojos y los signos positivos indican que las partículas se mueven hacia la derecha, los tonos verdes indican desplazamientos horizontales nulos. De acuerdo con esta figura, los desplazamientos horizontales se producen en las zonas donde existe un cambio importante en el espesor de los sedimentos, y el desplazamiento es siempre hacia la parte donde se encuentra el mayor espesor de sedimentos. De manera equivalente se puede decir que los desplazamientos horizontales en la masa de suelo se producen cuando hay un cambio rápido en la profundidad al lecho rocoso del acuífero. En las Figuras 6 y 7 se observa que una columna de suelo localizada en la parte más profunda del acuífero superficial experimenta un acortamiento mayor que una columna de suelo ubicada en una zona más somera del acuífero, lo cual genera un hundimiento diferencial provocando que la masa de suelo de la columna de la parte más profunda del acuífero jale a la masa de suelo de la parte más somera del acuífero hacia donde se producen los mayores hundimientos.

La Figura 9 muestra la distribución de esfuerzos principales S1 obtenida también a partir del análisis con elementos finitos. En esta sección se presentan los valores de los esfuerzos de tensión normales a un plano donde el esfuerzo cortante es cero. Los tonos verdes indican valores muy cercanos a cero, mientras que los tonos rojos representan los valores máximos. Como se puede observar en esta figura, los esfuerzos mayores se concentran en los extremos de los estratos rocosos. Este comportamiento es análogo al de un elemento empotrado, el cual se asemeja al de las coladas de lava empotradas también en las paredes del graben sobre las cuales actúa la fuerza producida por el incremento aparente del peso volumétrico del suelo. Según el análisis realizado, existen puntos en donde los esfuerzos máximos son cercanos a 3,800 ton/m². Tal magnitud de esfuerzos es suficiente para provocar la ruptura en una roca, lo que se manifestaría en la generación de sismos de baja intensidad con la generación o agrandamiento súbito de agrietamientos. En el valle de Aguascalientes existe un antecedente que apoya estos argumentos con la generación repentina de agrietamientos y el ensanchamiento súbito de fallamientos de suelo existentes, acompañados también de sismos de baja intensidad. Recientemente, en esta misma localidad, se han detectado sismos de baja intensidad en puntos y a profundidades que son consideradas parte del acuífero de donde se extrae actualmente el agua (Zermeño, comunicación personal). Los esfuerzos estimados en este

análisis podrían explicar el fenómeno ocurrido en el valle de Aguascalientes y sugieren que es teóricamente posible que el mismo fenómeno pueda ocurrir en el valle de Querétaro.

La Figura 10 muestra la misma distribución de esfuerzos principales S1 pero a una escala diferente. A esta escala se puede observar que en la parte superficial del relleno granular se generan esfuerzos de tensión en las zonas donde se tienen ubicados los fallamientos de suelo asociados a la Zona 1 de hundimientos. Lo mismo se verifica para el agrietamiento Oriente de la Zona 3 de hundimientos. También se observa que se predicen esfuerzos de tensión en las zonas que han sido consideradas como con riesgo de generación de agrietamientos debido a que son límite de zonas de hundimiento o puntos de concentración de deformaciones de extensión.

CONCLUSIONES

El concepto de esfuerzos efectivos modificado presentado en este trabajo permite definir los conceptos de peso volumétrico aparente e incremento aparente en el peso volumétrico, los cuales son útiles para modelar el proceso de subsidencia.

A partir de la simulación de los hundimientos realizado con elementos finitos sobre una sección del acuífero inferida a partir de mediciones gravimétricas e información litológica de pozos, se observa que el drenado de las capas superiores de sedimentos del acuífero del valle genera tanto deformaciones verticales de acortamiento y esfuerzos de compresión en la masa de suelo como también esfuerzos de tensión y desplazamientos horizontales. Adicionalmente, se observa que los fallamientos superficiales de suelo que cruzan la sección analizada coinciden con las zonas de concentración de esfuerzos principales de tensión y con las zonas de máximo desplazamiento horizontal por lo que se corrobora que los fallamientos superficiales se generan en los límites de las zonas de hundimientos.

Los resultados muestran que los estratos rocosos intercalados con los sedimentos están sujetos a esfuerzos por el incremento aparente del peso de la masa de suelo. A menos que estos se encuentren muy fracturados y disipen el esfuerzo al que están siendo sometidos a través de una deformación lenta y diferida a través del tiempo, teóricamente son susceptibles de presentar rompimientos súbitos.

De acuerdo con los resultados, para el caso en el que el abatimiento del acuífero sea uniforme, la topografía del lecho rocoso que subyace al relleno es el factor más importante para que se generen desplazamientos horizontales en las partículas del suelo, siempre y cuando no existan variaciones laterales importantes en las propiedades de la masa de suelo.

La sección analizada tiene una longitud de 13 kilómetros, mientras que los esfuerzos y deformaciones asociados al fallamiento de la masa de suelo se distribuyen hasta una profundidad de alrededor de 150 metros. A esta escala los

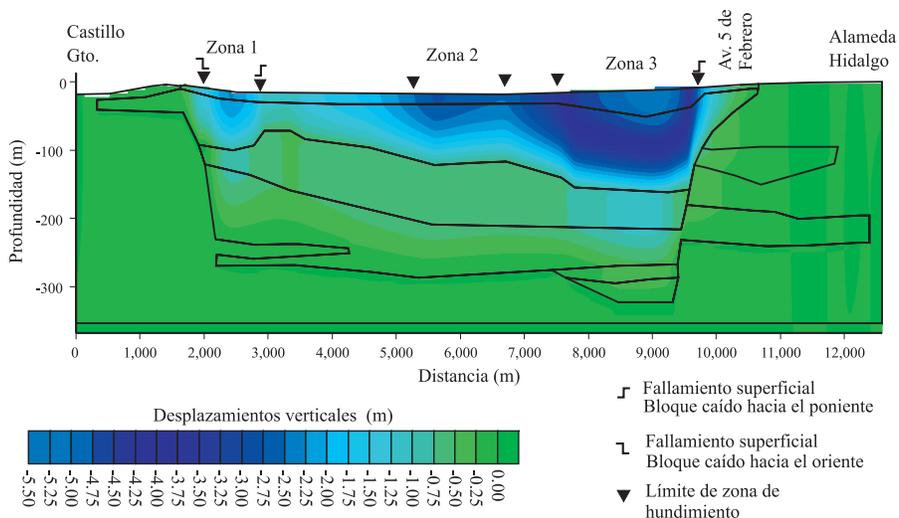


Figura 6. Distribución de desplazamientos verticales en la masa de suelo causados por el drenado de los rellenos sedimentarios que se encuentran arriba de la unidad Tmt AB.

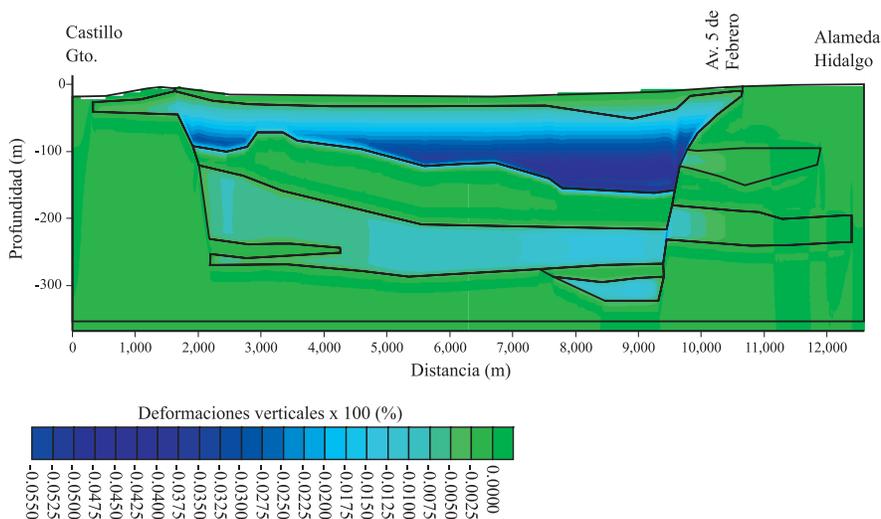


Figura 7. Distribución de deformaciones verticales en la masa de suelo causados por el drenado de los rellenos sedimentarios arriba de la unidad Tmt AB.

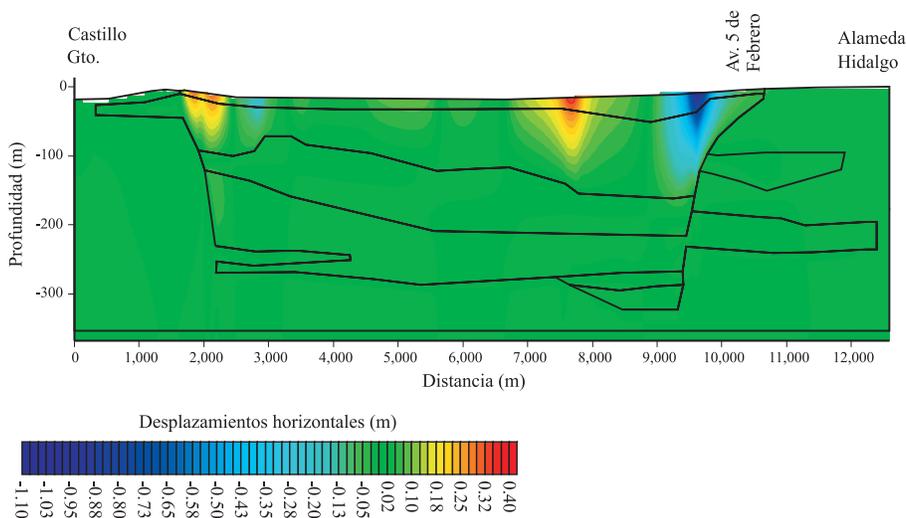


Figura 8. Distribución de desplazamientos horizontales en la masa de suelo causados por el drenado de los rellenos sedimentarios arriba de la unidad Tmt AB.

resultados sólo muestran el comportamiento regional del acuífero en cuanto a distribución de esfuerzos y deformaciones se refiere. Esto es suficiente para clasificar zonas con riesgo potencial de generación de agrietamientos a escala regional. Sin embargo, para obtener resultados más precisos y puntuales es necesario aumentar la densidad de estaciones gravimétricas para generar secciones más detallados de la variación del lecho rocoso.

La metodología desarrollada en este trabajo puede ser implementada para el cálculo de los hundimientos finales en una zona sujeta a extracción de agua subterránea. Sin embargo, la precisión de los resultados finales dependerá

del conocimiento de la estratigrafía del acuífero y del conocimiento de la relación esfuerzo-deformación de cada una de las diferentes capas del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren dar crédito a todos aquellos estudiantes que participaron en la adquisición de los datos gravimétricos en el valle de Querétaro en diferentes campañas de prácticas de campo y durante varios periodos, entre el 2001 y el 2004, en particular al Dr. Vsevolod Yutis quien

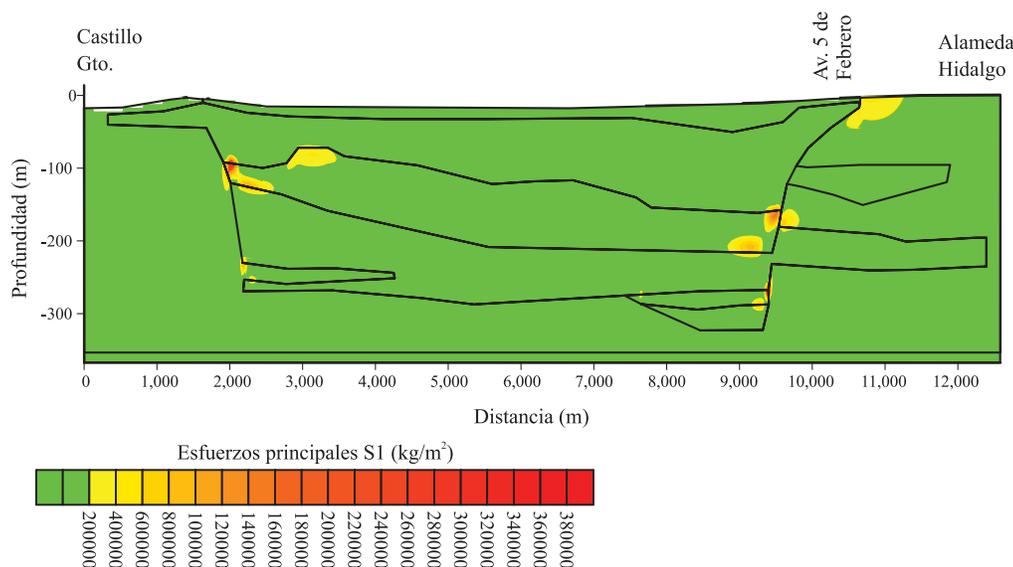


Figura 9. Distribución de esfuerzos principales de tensión en la masa de suelo causados por el drenado de los rellenos sedimentarios arriba de la unidad Tmt AB.

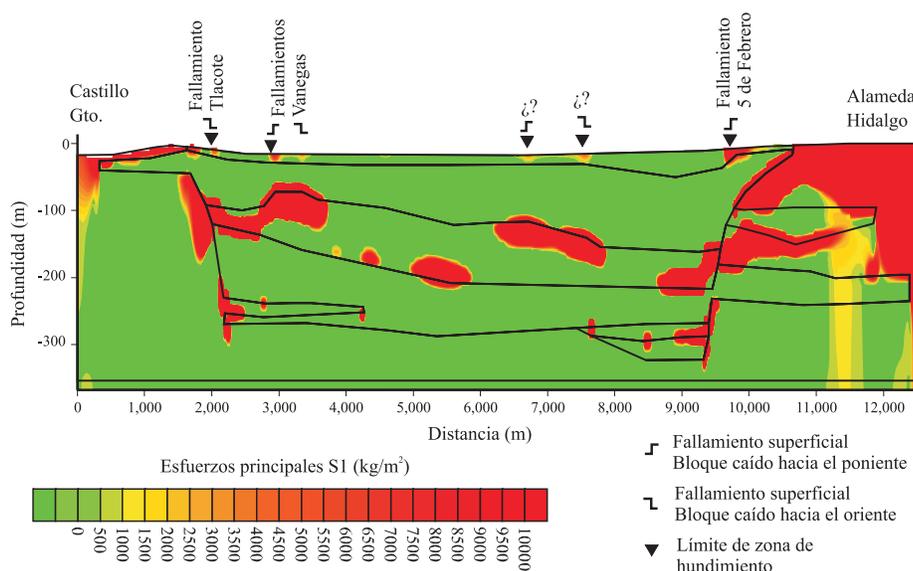


Figura 10. Distribución de esfuerzos principales de tensión en la masa de suelo causados por el drenado de los rellenos sedimentarios arriba de la unidad Tmt AB.

siempre mostró gran tenacidad a la hora de los levantamientos. Jesús Pacheco desea agradecer al CONACyT por el financiamiento de sus estudios de doctorado a través de una beca y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por el apoyo otorgado para la terminación de los mismos.

APÉNDICE

Para un suelo sumergido (Figura 2a), el peso que soporta la fase sólida del suelo 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:

$$W_1 = W_s - \gamma_w V_s \quad (1),$$

lo cual puede escribirse como:

$$W_1 = \gamma_s V_s - \gamma_w V_s \quad (2)$$

$$W_1 = (\gamma_s - \gamma_w) V_s \quad (3)$$

$$W_1 = (\gamma_s - \gamma_w) H A_s \quad (4)$$

$$\frac{W_1}{A_s} = (\gamma_s - \gamma_w) H \quad (5)$$

y finalmente:

$$\sigma_1 = \gamma_s' H \quad (6)$$

donde σ_1 es el esfuerzo a que está sometida la porción sólida de la masa de suelo cuando ésta se encuentra sumergida; γ_s' es el peso del volumen sumergido de la fase sólida del suelo; y H es la profundidad medida a partir del nivel del agua.

De la Ecuación 3 se deduce que

$$\frac{W_1}{V_s} = (\gamma_s - \gamma_w) \quad (7)$$

$$\gamma_1 = \gamma_s' \quad (8),$$

el cual es el peso volumétrico que soportan las partículas de suelo, y que provoca el esfuerzo σ_1 cuando éstas se encuentran sumergidas.

Cuando el nivel del agua desciende se presentan dos estados en la masa de suelo, uno parcialmente saturado por arriba del nivel estático y otro saturado de este nivel hacia abajo (Figura 2b). Para la zona parcialmente saturada el esqueleto del suelo soportará su propio peso (W_s) más el peso del agua remanente que se encuentra en forma discontinua (W_w):

$$W_2 = W_s + W_w \quad (9)$$

que se puede escribir como:

$$W_2 = W_s + w W_s \quad (10)$$

$$W_2 = (1+w) W_s \quad (11)$$

$$W_2 = (1+w) \gamma_s V_s \quad (12)$$

$$\frac{W_2}{A_s} = (1+w) \gamma_s H' \quad (13)$$

$$\sigma_2 = (1+w) \gamma_s H' \quad (14)$$

donde w es el contenido de agua o humedad de la masa de suelo parcialmente saturada expresada en forma decimal, y H' es la profundidad medida a partir de la parte superior del estrato drenado.

Por otro lado, de la Ecuación 12 se deduce que:

$$\frac{W_2}{V_s} = (1+w) \gamma_s \quad (15)$$

$$\gamma_2 = (1+w) \gamma_s \quad (16)$$

en donde γ_2 es el peso por unidad de volumen de sólidos que soporta la fase sólida del suelo cuando este se encuentra parcialmente saturado y genera el esfuerzo σ_2 ; en este peso está incluido el efecto del peso del agua que se encuentra en el suelo en forma de humedad. Este peso es diferente a los pesos γ_m y γ_s , y de hecho se trata de un "peso volumétrico aparente" del suelo para un estado parcialmente saturado. El peso volumétrico γ_1 (Ecuación 8) es el peso volumétrico aparente del suelo cuando se encuentra sumergido y es igual al peso volumétrico sumergido de los sólidos (γ_s').

En la zona saturada o sumergida (Figura 2b), la estructura sólida del suelo soporta 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), más el peso producido por la masa de suelo drenada ($W_s + W_w$), es decir:

$$W_3 = (W_s - \gamma_w V_s) + (W_s + W_w) \quad (17)$$

lo cual puede escribirse como:

$$W_3 = (\gamma_s V_s - \gamma_w V_s) + (W_s + w W_s) \quad (18)$$

$$W_3 = (\gamma_s V_s - \gamma_w V_s) + (1+w) W_s \quad (19)$$

$$W_3 = (\gamma_s - \gamma_w) V_s + (1+w) \gamma_s V_s \quad (20)$$

$$W_3 = (\gamma_s - \gamma_w) H A_s + (1+w) \gamma_s H' A_s \quad (21)$$

$$W_3 = [\gamma_s' H + (1+w) \gamma_s H'] A_s \quad (22)$$

$$\frac{W_3}{A_s} = \gamma_s' H + (1+w) \gamma_s H' \quad (23)$$

$$\sigma_3 = \gamma_s' H + (1+w) \gamma_s H' \quad (24)$$

En este caso no es posible derivar una expresión para determinar el peso volumétrico aparente, puesto que el volumen de sólidos en la Ecuación 20 es diferente en cada término. El V_s del primer término corresponde al volumen de sólido que está sumergido y sobre el cual existe un efecto de sustentación hidráulica o flotación, y el V_s del segundo término es el volumen de los sólidos del estrato parcialmente saturado y cuyo peso produce una presión σ_2 sobre los sólidos por debajo del nivel del agua.

Por otro lado, según Juárez-Badillo y Rico-Rodríguez (2002) el esfuerzo efectivo es el esfuerzo normal que gobierna los cambios volumétricos o la resistencia de un suelo. De acuerdo con esto, las expresiones 6 y 14 y 24 representan el *esfuerzo efectivo* en el esqueleto del suelo en función de la profundidad para las condiciones establecidas en la Figura 2.

El cambio del estado inicial en equilibrio, donde el suelo se encuentra en condición sumergida, a un estado final en donde parte de la masa de suelo se encuentra en condición parcialmente saturada y parte en condición sumergida (Figuras 2a y 2b, respectivamente), genera un incremento en el esfuerzo efectivo que para la zona parcialmente saturada (profundidad H') está dado por

$$\Delta\sigma_{ps} = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (25)$$

sustituyendo σ_2 y σ_1 se tiene

$$\Delta\sigma_{ps} = (1+w)\gamma_s H' - \gamma_s' H' \quad (26)$$

$$\Delta\sigma_{ps} = [(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] H' \quad (27)$$

Este incremento en el esfuerzo efectivo puede escribirse como:

$$\Delta \frac{W}{A_s} = [(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] H' \quad (28)$$

$$\Delta \frac{W}{A_s H'} = [(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] \quad (29)$$

$$\Delta \frac{W}{V_s} = [(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] \quad (30)$$

$$\Delta\gamma = [(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] \quad (31)$$

Esta última ecuación representa el peso por unidad de volumen de sólidos que produce un esfuerzo efectivo en la estructura sólida del suelo de la misma magnitud que $\Delta\sigma_{ps}$. A este peso lo definimos como el "incremento aparente del peso volumétrico" y se puede generar en cualquier suelo por efecto del cambio de la condición sumergida a parcialmente saturada.

Para la zona saturada una vez que ha habido un descenso en el nivel de agua (Figura 2b), se tiene que

$$\Delta\sigma_s = \sigma_3 - \sigma_1 \quad (32)$$

y sustituyendo σ_3 y σ_2 se tiene finalmente

$$\Delta\sigma = [\gamma_s' H + (1+w)\gamma_s H'] - [\gamma_s' (H'+H)] \quad (33)$$

$$\Delta\sigma = \gamma_s' H + (1+w)\gamma_s H' - \gamma_s' H' - \gamma_s' H \quad (34)$$

$$\Delta\sigma = (1+w)\gamma_s H' - \gamma_s' H' \quad (35)$$

$$\Delta\sigma = [(1+w)\gamma_s - \gamma_s'] H' \quad (36)$$

el cual es el esfuerzo σ_2 cuando H' es igual al espesor del estrato drenado, lo que implica que el incremento en el esfuerzo efectivo en la zona saturada se genera por efecto de la presión de la columna de suelo drenado sobre la estructura sólida del suelo sumergido y el incremento aparente en el peso volumétrico en la zona saturada es cero. Las expresiones derivadas para los esfuerzos se pueden aplicar a un sistema acuífero en la medida en que A_s y A_v en una columna de suelo sean constantes a lo largo de cualquier sección transversal.

REFERENCIAS

- Alaniz-Álvarez S.A, Nieto-Samaniego A.F., Reyes-Zaragoza M.A., Orozco-Esquivel M.T., Ojeda-García A.C., Vassallo F.L., 2001, Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18(2), 129-148.
- Álvarez-Manilla, A., 1999, Modelo del mecanismo de agrietamiento en el valle y zona metropolitana de Querétaro: México, Universidad Autónoma de Querétaro, Tesis de Maestría en Ciencias (Mecánica de Suelos), 74 p.
- Aguirre-Díaz, G.J., Zúñiga-Dávila Madrid, R., Pacheco-Alvarado, F.J., Guzmán-Speziale, M., Nieto-Obregón, J., 2000, El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo: GEOS, Boletín de la Unión Geofísica Mexicana, 20, 2-7.
- Arroyo, M., Arzate, J., Yutis, V., Martínez, J., 2002, Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del estado de Querétaro, área de geofísica, geología y geotécnica: Querétaro, México, Comisión Estatal de Agua (CEA), Reporte técnico, Tomo I, 567 p.
- Bell J.W., Helm D.C., 1998, Ground cracks on quaternary faults in Nevada. Hydraulic and tectonic, *en* Borchers, J.W. (ed.), Land Subsidence Case Studies and Current Research. Proceedings of Dr. Joseph F. Poland Symposium on Land Subsidence: Association of Engineering Geologists, Special Publication, 8, 165-173.
- Carreón-Freyre D., Cerca, M., Luna-González L., Gámez-González F.J., 2005, Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22(1), 1-18.
- Comisión Nacional del Agua (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 Aguas subterráneas, Reporte interno, 26 p.
- Holzer, T.L., 1984, Ground failure by groundwater withdrawal from unconsolidated sediments, *en* Holzer, T.L. (ed.), Man-induced Land Subsidence: Boulder, Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology, 6, 67-105.
- Hunt, R.E, 1986, Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation: New York, McGraw-Hill, 729 p.
- Juárez-Badillo, E., Rico-Rodríguez, A., 2002, Mecánica de Suelos, Tomo I. Fundamentos de mecánica de suelos: México, Editorial Limusa, 642 p.
- Mishra, S.K., Singh, R.P., Chandra, S., 1993, Prediction of subsidence in the Indo-gangetic basin carried by groundwater withdrawal: Engineering Geology, 33, 227-239.
- Pacheco-Martínez, J., 2007, Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales: Querétaro, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ceociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis doctoral, 232 p.
- Pacheco, J., Arzate, J.A., Rojas, E., Yutis, V., Arroyo, M., Ochoa, G., 2006, Delimitation of soil fissure zones due to ground subsidence using gravity data and finite elements modeling in the Queretaro valley Mexico: Engineering Geology, 84, 143-160.
- Poland, J.F., 1984, Mechanics of land subsidence due to fluid withdrawal, *en* Poland, J.F. (ed.), Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization (UNESCO), Studies and Reports in Hydrology 40, prepared for the International Hydrological Programme, Working Group 8.4, p. 37-54.
- Rivera, A., Ledoux, E., de Marsily, G., 1991, Nonlinear modelling of groundwater flow and total subsidence of the México City aquifer-aquitard system, *en* Johnson, A.I. (ed.), Land Subsidence, Proceedings of the fourth International Symposium on Land Subsidence: International Association of Hydrological Sciences (IAHS), Publication no. 200, 45-58.
- Rojas, E., Arzate, J., Arroyo, M., 2002, A method to predict the ground fissuring and faulting caused by regional groundwater decline: Engineering Geology, 65, 245-260.
- Sheriff, R.E., Geldart, L.P., 1991, Exploración Sismológica, v. 1: México Editorial Limusa, 309 p.

- Shimizu M., 1998, Application of a large-strain finite element model in predicting land subsidence due to the variation of ground-water level, *en* 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, 8, 239-247.
- Suleiman S.E.B., 1994, Earth fissures caused by groundwater withdrawal in Sarir South agricultural project area, Libya: Applied Hydrology, 1, 45-52.
- Talwani, M., Lamar, W.J., Landisman M., 1959, Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino Submarine Fracture Zone: Journal of Geophysical Research, 64(1), 49-59.
- Terzaghi, K., 1956, Theoretical Soil Mechanics: New York, John Wiley and Sons, 528 p.
- Trejo-Moedano, A., 1989, Estratigrafía y Propiedades Mecánicas del Subsuelo del Valle de la Zona Urbana de Querétaro: Querétaro, México, Universidad Autónoma de Querétaro, 150 p.
- Trejo-Moedano, A., Martínez-Baini, A., 1991, Agrietamiento de suelos en la zona Querétaro, *en* Agrietamientos de Suelos: México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 67-74.
- Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), 1998, Zonificación de la familia de fallas y caracterización mecánica de los suelos donde se proyecta construir un centro comercial: Universidad Autónoma de Querétaro, Laboratorio de Mecánica de Suelos, Informe técnico, 42 p.
- Yu, X., 2004, Field evaluation of ground stiffness by static and dynamic test (en línea): The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 9 D.

Manuscrito recibido: Enero 25, 2007

Manuscrito corregido recibido: Mayo 22, 2007

Manuscrito aceptado: Junio 15, 2007