

Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro

**Dora Carreón-Freyre^{1,*}, Mariano Cerca^{2,1},
Laura Luna-González³ y Francisco J. Gámez-González⁴**

¹ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla,
Apartado Postal 1-742, 76001 Querétaro, Qro., México.

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México, D. F., México.

³ Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 México D. F., México.

⁴ Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal en Querétaro, Av. Hidalgo 293,
Fracc. Las Campanas, 76010 Querétaro, Qro., México.

* freyre@geociencias.unam.mx

RESUMEN

Para este trabajo se llevó a cabo una revisión del modelo existente sobre el sistema acuífero y la geología del Valle de Querétaro. Se incorpora una interpretación sobre la estratigrafía de la secuencia terciaria en el Valle de Querétaro, basada en los registros litológicos de 70 pozos de aprovechamiento de agua. Para la evaluación de las condiciones de flujo de agua subterránea se integraron las mediciones de 32 pozos de monitoreo, y los datos de niveles piezométricos de 196 pozos medidos entre los años de 1970 y 2003. En el Valle de Querétaro, la carga hidráulica ha disminuido entre 10 y 160 m durante las últimas dos décadas. El análisis de la evolución piezométrica muestra que el descenso ha sido diferencial, y se infiere que estas variaciones están influenciadas por las discontinuidades estratigráficas y estructurales. En particular las variaciones en el tiempo del nivel piezométrico registrado en pozos localizados a ambos lados de la Falla Central, sugieren que esta estructura constituye una frontera que delimita compartimentos hidráulicos diferentes dentro del sistema acuífero. El análisis de isótopos ambientales ($\delta^{18}\text{O}$ y δD) sugiere que el agua subterránea en el valle no proviene directamente de la recarga vertical. De acuerdo a las propiedades físicas, que se pueden atribuir a las diferentes unidades estratigráficas, el modelo propuesto para el acuífero del Valle de Querétaro es del tipo multicapa con un sistema de flujo intermedio entre local y regional.

Palabras clave: Hidrogeología, fracturamiento, secuencia estratigráfica, cuenca sedimentaria, Querétaro, México.

ABSTRACT

In this work we review the existing models on the aquifer system and geology of the Valley of Querétaro. The interpretation of the lithological record in 70 water extraction wells helped to detail the stratigraphy of the first 200 m. In order to evaluate the characteristics of the groundwater flow, 32 monitoring wells and the measured piezometric levels of 196 wells for an interval between 1970 and 2003 were compiled. The hydraulic head has decreased between 10 and 160 m during the last two decades. The analysis of the piezometric evolution shows that the differences in the groundwater withdrawal are delineated by the stratigraphic and structural discontinuities. Variations in time of the piezometric levels of wells located in both sides of the Falla Central suggest that this structure act as a boundary between different hydraulic compartments. The isotopic analysis of $\delta^{18}\text{O}$ and δD suggest that groundwater in

the valley is not influenced directly by vertical recharge. According to the physical properties of the stratigraphic units, a multilayer aquifer model for the Valley of Querétaro, with a flow regime between local and regional is proposed.

Key words: Hydrogeology, fracturing, stratigraphic sequence, sedimentary basin, Querétaro, Mexico.

INTRODUCCIÓN

La distribución espacial de las propiedades hidráulicas y las discontinuidades estructurales en los materiales geológicos influyen en gran medida sobre las trayectorias complejas que presenta el flujo de agua subterránea en un sistema acuífero. A pesar de esto, son pocos los estudios que han considerado la influencia de la heterogeneidad en las propiedades geológicas y/o de las estructuras locales, lo cual generalmente se debe a la falta de un conocimiento detallado de las secuencias estratigráficas involucradas. Estudios recientes muestran que las fallas y fracturas pueden actuar como fronteras hidráulicas para separar sistemas acuíferos en compartimentos diferentes, tanto a nivel regional como en cuencas sedimentarias bien diferenciadas (Carrillo-Rivera, 2000; Mayo y Koontz, 2000). Por lo anterior se vuelve cada vez más necesario considerar las heterogeneidades del medio geológico para hacer evaluaciones confiables del recurso hídrico.

El presente estudio se llevó a cabo en el Valle de Querétaro, que es una cuenca sedimentaria delimitada por volcanes y fallas localizada en la parte norte de la Faja Volcánica Transmexicana (Figura 1). El modelo conceptual vigente del acuífero de este valle propone un acuífero granular y fracturado, de tipo libre o semiconfinado, que descansa sobre un basamento impermeable con topografía irregular (CEA y UAQ, 2002; CNA, 2003). Según este modelo, la recarga vertical por infiltración superficial tiene un papel importante para el abastecimiento del acuífero. El detalle alcanzado en el conocimiento de la geología de la zona hace necesario un replanteamiento del modelo que considere que: (1) el acuífero granular está compuesto por capas de material heterogéneo y afectado por discontinuidades laterales; (2) la secuencia superficial está formada principalmente por arcillas y limos que pueden funcionar como acuitardos y retardar o impedir la recarga vertical y; (3) no está bien definida la profundidad y características del basamento considerado impermeable, debido principalmente a la heterogeneidad en el fracturamiento de las rocas en la base de la secuencia.

Por otro lado, aunque la geología de la región está bien documentada, el conocimiento sobre las secuencias sedimentarias posteriores al Mioceno que rellenan el Valle de Querétaro es prácticamente inexistente. El conocimiento de estas secuencias es de gran importancia debido a que controlan una buena parte del flujo local e intermedio de agua subterránea en el valle. En particular, el espesor de la zona no saturada, mayor que 100 m en la actualidad, debe tener

una gran influencia sobre la componente vertical de recarga del acuífero. En este trabajo se llevó a cabo una revisión del modelo conceptual existente, incorporando nuevos datos que permitan sistematizar el estudio del acuífero y proponer un nuevo modelo acorde con las observaciones anteriores. Los resultados presentados en este trabajo pretenden mostrar que la variabilidad en las propiedades hidrogeológicas en el Valle de Querétaro no es aleatoria, sino que se encuentran directamente relacionadas con su historia geológica.

METODOLOGÍA

Interpretación geológica

La caracterización de unidades geológicas en superficie y en el subsuelo se basó en una recopilación de información cartográfica, litológica y estudios previos con el fin de obtener una columna estratigráfica compuesta, coherente con la historia geológica del área. Esta información procede de tres fuentes principales: (1) mapas y estudios geológicos y geofísicos regionales, (2) estudios geotécnicos, y (3) registros litológicos de pozos de aprovechamiento de agua. En la mayoría de los mapas geológicos se reporta la superficie del relleno del Valle de Querétaro como aluvión de edad cuaternaria o sedimentos de origen fluvial y lacustre de edad terciaria, sin especificar el tipo de material sedimentario de que se trata realmente. Los perfiles geofísicos disponibles tienen una resolución regional (perfiles de 5 km de profundidad en promedio; CEA y UAQ, 2002) inferior a la requerida para el estudio de las secuencias involucradas en el flujo del agua subterránea (100–500 m). Los trabajos de caracterización geotécnica generalmente son estudios puntuales, en su mayoría sólo hasta cinco metros de profundidad. Una fuente importante de información para el análisis de las condiciones de flujo en una escala intermedia entre las dos anteriores, es el registro litológico de los pozos de aprovechamiento de agua, que en su mayoría varían entre 100 y 200 m en profundidad (34 pozos), 28 pozos tienen una profundidad entre 200 y 500 m y existen cuatro pozos de profundidad mayor a 500 m. Para este estudio se interpretaron los registros litológicos de 70 pozos ubicados en la mitad oriental del graben de Querétaro. Una interpretación realista de estos registros requiere del establecimiento previo de un modelo conceptual basado en las secuencias que afloran en superficie y en su correlación con pozos cercanos. La información en el registro de los pozos consiste, en su mayoría, sólo en una

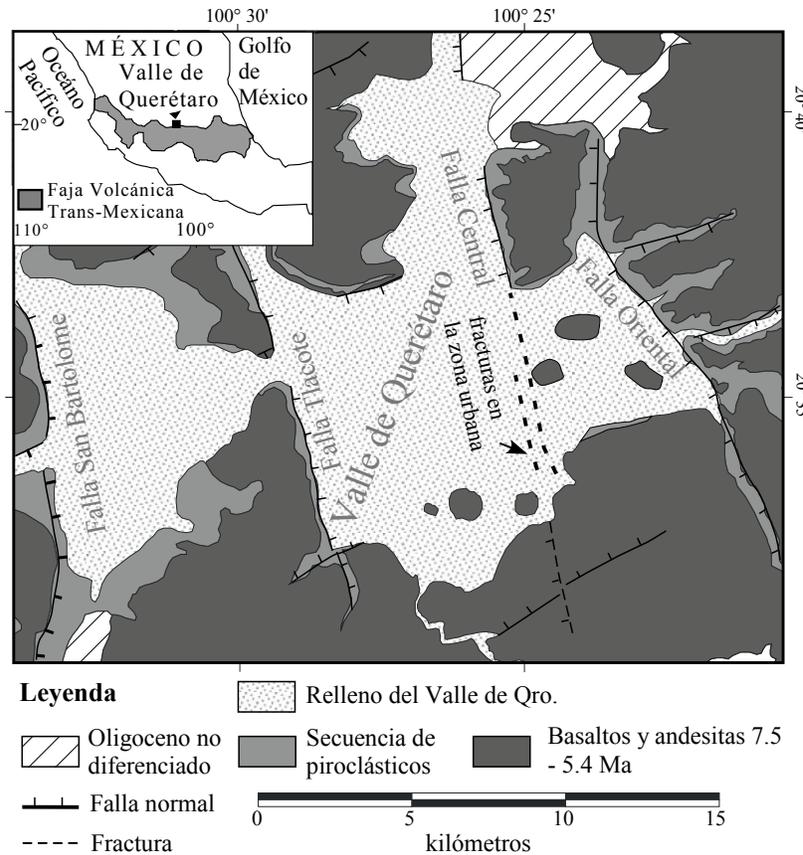


Figura 1. Localización de la zona de estudio. El Valle de Querétaro está localizado en la parte centro-norte de la Faja Volcánica Transmexicana, a una altura de *ca.* 1800 m sobre el nivel del mar. El valle se encuentra delimitado por dos sistemas de fallas normales con dirección norte-sur y este-oeste, que producen una estructura en forma de graben que contiene relleno volcánico-sedimentario. Las fracturas que afectan el valle son paralelas a las fallas regionales norte-sur.

breve descripción del tipo de roca, tamaño de grano, y en algunos casos características físicas de los materiales (como color, resistencia, fracturas, o registro eléctrico). Aproximadamente el 50% de los 70 pozos analizados fueron descritos originalmente por personal técnico de CEA, CNA, y otras dependencias relacionadas con el manejo del agua. Del 50% restante, al menos la mitad fueron analizados por personal especializado de empresas particulares. Una vez reinterpretados, los registros litológicos de los pozos fueron integrados en una tabla que permitió su manejo y su representación gráfica. En las Tablas 1 y 2 se muestra un ejemplo de la base de datos utilizada para el análisis de la distribución de las unidades estratigráficas. En la Tabla 1 se presenta la información estratigráfica interpretada de nueve registros litológicos, que permite el análisis comparativo de sus profundidades y espesores. La Tabla 2 muestra la elevación del brocal y la profundidad de los nueve pozos para calcular la elevación de cada unidad estratigráfica.

La información de la cartografía geológica se integró con la interpretación de los registros de pozos y otra información geográfica como la red hidrológica, morfología e infraestructura urbana, mediante un Sistema de Información Geográfica (Arc GIS 8.2). La interpretación y ubicación

espacial de los registros litológicos de pozos permitió visualizar la distribución del relleno sedimentario del Valle y el análisis de la variabilidad espacial de las unidades estratigráficas. Las unidades identificadas se utilizaron para la construcción de secciones, de acuerdo con la técnica de modelos sólidos descrita por Lemon y Jones (2003), que permitieron establecer el modelo conceptual del acuífero. Cabe señalar que los resultados que se presentan en este trabajo pueden ser detallados a medida que se integre más información a la base de datos. En este aspecto ha sido de suma importancia el diseño de una base de datos capaz de integrar un amplio número de variables y que además pueda ser actualizada frecuentemente sin modificar su estructura primaria (ver Gogu *et al.*, 2001), debido a la gran cantidad y diversidad en la calidad de los datos utilizados.

Análisis de las condiciones de flujo del agua subterránea

Para la evaluación de las condiciones de flujo de agua subterránea se compiló una base de datos inicial de 350 pozos de extracción ubicados en el Valle de Querétaro

Tabla 1. Ejemplo de la tabla que se utiliza para integrar los resultados de la interpretación litológica de la información de los pozos en el sistema de información geográfica. Cada registro es identificado por un número de pozo que incluye su localización exacta y la elevación del brocal sobre el nivel del mar. Los números en la tabla corresponden a la profundidad máxima en metros que alcanza cada unidad litológica. La última profundidad reportada corresponde a la profundidad total del pozo.

Unidad Estratigráfica	Número de pozo									
	579	630	660	727	910	954	988	1322	2050	2396
Q Al	2	40	2	1.5	12	1	2	4	5	
Tp Ar-Cg	80	138	70		76	56		50	20	
Tmt AB	128	206			104	160	70	70	35	49
Tom Py Lac	200	256	160		226	187	110	80	75	190
Tmm AB		280		70	244		190	202	235	
Tmi V										235
To A							280	274	300	
Arcilla verde										330
To R							298			
Te Cg-Ar										350

reportados en trabajos previos (CNA, 1996; CNA, 2000; CEA y UAQ, 2002; CNA, 2003; y archivos de CNA). Además, se integraron las mediciones piezométricas de 32 pozos de monitoreo y los datos de niveles piezométricos de 196 pozos medidos entre los años de 1970 y 2003 (Gerencia Estatal de la Comisión Nacional del Agua; la localización de los pozos se señala en el mapa de la Figura 2).

El análisis del cambio de la superficie del nivel de agua, obtenido de la información piezométrica de los pozos, permitió inferir el comportamiento hidráulico (acuíferos y acuitardos) de las unidades que rellenan el valle. La interpolación de los datos piezométricos permitió obtener un registro continuo, para los años de 1970 hasta 2003, de las variaciones piezométricas con el tiempo (hidrógrafos) de 196 pozos. Con esta base de datos, como primera aproximación, se realizaron configuraciones de isótopos de carga hidráulica mediante interpolación básica, utilizando un modelo lineal para diferentes periodos analizados. Es importante mencionar que una limitación importante de estas interpolaciones es que no consideran el análisis de los sesgos inducidos por la densidad de pozos en diferentes zonas del valle y el ajuste no lineal de los datos.

Una determinación confiable de las condiciones de flujo de agua subterránea requiere el uso de técnicas complementarias como modelado hidrogeoquímico y el empleo de trazadores isotópicos como ^{18}O y D (Deuterio, ^2H) (Freeze y Cherry, 1979; Fetter, 1988). Esta última herramienta es fundamental porque el ^{18}O y el D se incorporan a las moléculas de agua como una parte integral, y los procesos de enriquecimiento–empobrecimiento de estos isótopos en el agua permiten determinar su origen, elevación de la recarga y mezcla de aguas de diferente origen (Clark y Fritz, 1997). Se tomaron 25 muestras de agua subterránea en pozos representativos para determinar el contenido de los isótopos ^{18}O y D. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Espectrometría de Masas del Instituto de Geología de la UNAM, mediante un analizador elemental de termodecomposición a alta temperatura TC/EA marca FININGAN acoplado a un espectrómetro de masas

FININGAN Delta Plus XL. Los resultados obtenidos se integraron con la información de parámetros índice del flujo del agua subterránea tales como la temperatura y la conductividad eléctrica, medidos en 42 pozos de extracción de agua.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Marco geológico del Valle de Querétaro

El Valle de Querétaro es reportado en términos morfológicos como una depresión localizada entre la Ciudad de Querétaro y la falla de Tlacote (Trejo-Moedano, 1989; CEA y UAQ, 2002), y corresponde a una superficie horizontal entre 1,790 y 1,800 m de elevación. Geológicamente, el Valle de Querétaro comprende una cuenca sedimentaria delimitada por fallas regionales que se agrupan en dos sistemas activos desde el Mioceno (Álaniz-Álvarez *et al.*, 2002) con direcciones principales norte–sur y este–oeste (ver Figura 2). La configuración actual del valle es la de un graben con forma rectangular delimitado por el sistema de fallas con dirección norte–sur y desplazamiento normal, cuyos flancos occidental y oriental pueden ubicarse en la Falla San Bartolomé y la Falla Oriental, respectivamente

Tabla 2. Datos generales para calcular la elevación de cada unidad estratigráfica en cada pozo.

No. de Pozo	Elevación del brocal (m s.n.m.)	Profundidad del pozo (m)
630	1,808	280
660	1,817	160
727	1,815	70
910	1,802	244
954	1,810	187
988	1,839	298
1322	1,803	274
2050	1,814	300
2396	1,947	350

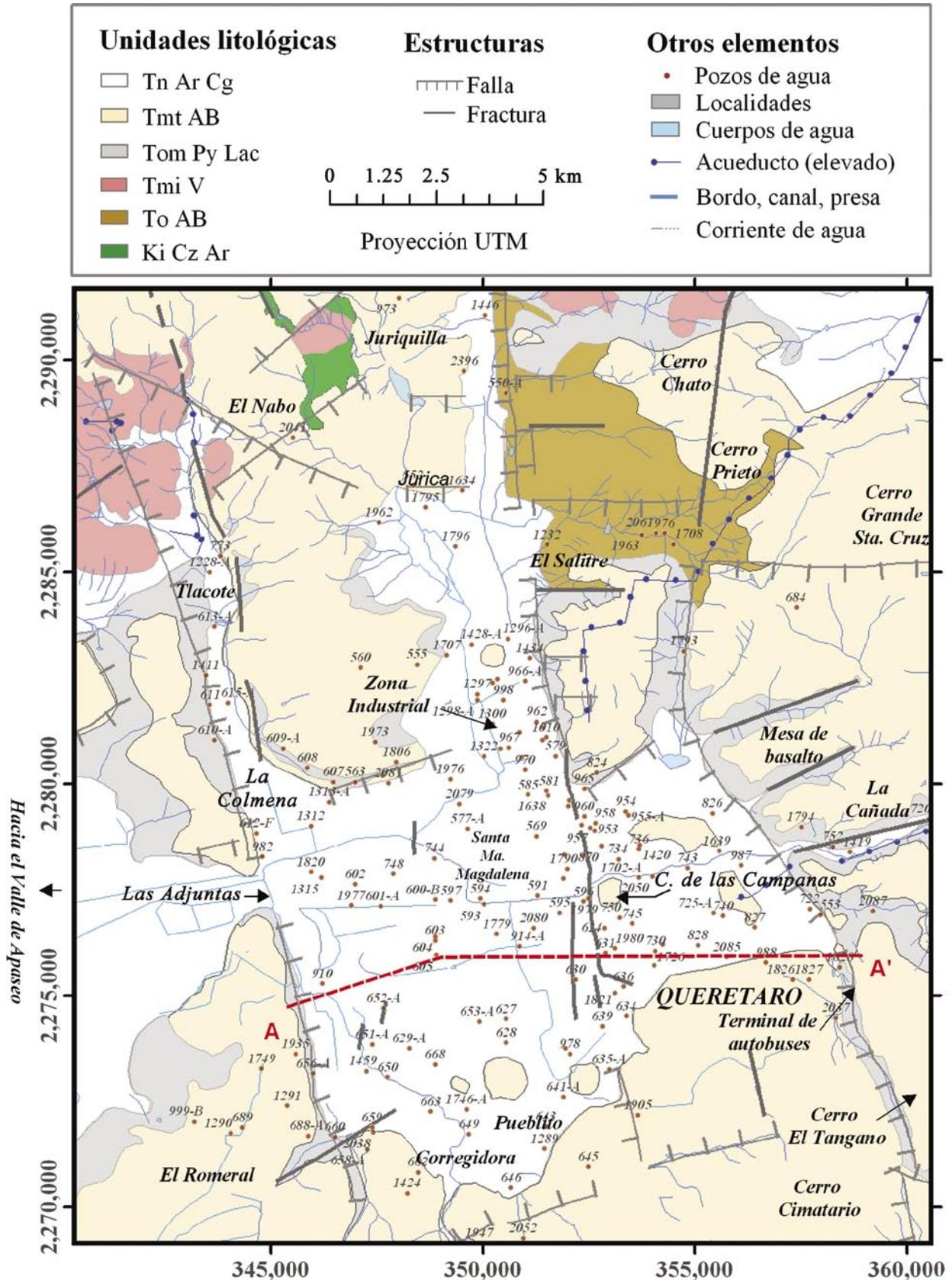


Figura 2. Mapa Geológico del Valle de Querétaro, donde se muestra la distribución de fracturas y de los pozos de extracción ubicados en la zona. La zona urbana de Querétaro se localiza en la parte oriental del valle. La clave de la estratigrafía se detalla en el texto. La sección A-A' se presenta en la Figura 5.

(Figura 1). La estratigrafía del Valle de Querétaro y de los alrededores se ha presentado ampliamente en la literatura (Trejo-Moedano, 1989; Trejo-Moedano y Bains, 1991; Aguirre-Díaz *et al.*, 2000; Álvarez-Manilla, 2000; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001; Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001, 2002; CEA y UAQ, 2002, CNA, 2003). En la Figura 2 se muestra el mapa geológico de la zona.

En general, la columna estratigráfica del área de Querétaro consiste de un basamento compuesto de rocas marinas del Cretácico, cubierto por una secuencia continental del Terciario consistente en unidades alternadas de rocas volcánicas y sedimentarias. La interpretación de las unidades litológicas en el valle se basó en el reconocimiento de unidades o conjuntos de unidades que sirvieron como guía para identificar el registro litológico de cada pozo (Figura 3). Se partió del reconocimiento de rocas volcánicas de composición básica (andesitas y basaltos) que fueron correlacionadas con las rocas que afloran en la superficie (por ejemplo, la unidad litológica de andesitas y basaltos del Mioceno Tardío, Tmt AB, en las Figuras 2 y 3). El reconocimiento de esta unidad fue confirmado en los registros litológicos por la presencia, debajo de ella, de una secuencia de origen piroclástico y sedimentario que se correlaciona con la secuencia observada en la superficie (Tom Py Lac, Figuras 2 y 3). Una vez reconocido este contraste litológico en la secuencia, la parte inferior de los registros litológicos fue correlacionada con unidades documentadas en trabajos previos para zonas adyacentes al valle, tomando como base la columna compuesta descrita por Alaniz-Álvarez *et al.* (2001, 2002) (Figura 4).

La secuencia sedimentaria que se encuentra sobre la unidad de andesitas y basaltos rellena el Valle de Querétaro y tiene un espesor variable entre decenas y cientos de metros. Esta unidad se compone principalmente de material sedimentario, aunque en algunos sitios se encuentran intercaladas capas de rocas volcánicas (Figura 3). En el estudio realizado por la CEA y UAQ (2002) se reporta un pozo perforado recientemente en el centro del valle, al sur de Sta. María Magdalena, el cual muestra un registro sedimentario continuo de más de 400 m. La interpretación de los cortes litológicos de pozos permite inferir que el relleno de la cuenca registra un depósito continuo y normalmente graduado desde su formación en el Mioceno Tardío–Plioceno (~5 Ma). En la Figura 4 se muestra una columna esquemática simplificada obtenida a partir de la interpretación litológica y modificada de Alaniz-Álvarez *et al.* (2001).

Descripción de la secuencia estratigráfica en la zona del Valle de Querétaro

Las rocas más antiguas en la región son calizas con intercalaciones de lutitas y areniscas (Ki Cz Ar) que afloran en la zona de Juriquilla y se encuentran presentes en el corte litológico de El Nabo (pozo 2041, desde 14 m hasta más de 900 m de profundidad). Es incierto si estas rocas se

encuentran en la zona del Valle de Querétaro, debido a que los pozos hasta ahora localizados en esa zona no llegan a cortarlas. En algunos registros litológicos de pozos cercanos a la zona de Juriquilla y el Nabo (pozos 759, 1709, 980 y 2396) se identificaron capas de conglomerado y areniscas (Te Cg Ar), cuya posición estratigráfica sobre la secuencia de calizas y por debajo de riolitas y tobas, es equivalente al Conglomerado Rojo de Guanajuato del Eoceno (ver Aranda-Gómez y McDowell, 1998).

Comúnmente se reporta una unidad volcánica de composición intermedia a básica (To AB), intensamente fracturada y alterada (por ejemplo en los pozos 1817, 1707, 1930, 2082), que se presenta en la base o intercalada dentro de una secuencia de tobas y lavas de composición silícica. Rocas similares que afloran en el poblado El Salitre fueron correlacionadas por Alaniz-Álvarez *et al.* (2001) con la Andesita El Cedro (ToA) que tiene edades entre 30.6 y 30.7 Ma en Guanajuato (Cerca-Martínez *et al.*, 2000).

En los registros litológicos del centro del valle (por ejemplo pozos 2427, 1707, 1930, 1973) se reportan secuencias de riolita, tobas y arcillas (To R, Tmi V). En la mayoría de los registros de pozos, las secuencias de rocas volcánicas silícicas tienen espesores de 10 a 30 m por encima y debajo de la unidad anterior (To AB), pero particularmente en el pozo profundo Zona Norte II No. 3 (Figura 3c) esta secuencia tiene un espesor considerable desde los 268 m hasta una profundidad de 650 m. Para fines de caracterización, en los registros litológicos de pozos se incluyen dentro de este grupo a formaciones tobáceas de composición riolítica a dacítica del Oligoceno y Mioceno que han sido reportadas en el Valle de Querétaro (López-Hernández, 1996; Alaniz-Álvarez, 2001). En la superficie, estas secuencias están representadas por domos de composición dacítica en la zona al norte de Tlacote, los cuales forman un lineamiento con dirección NE (Dacita Obrajuelo), y por la Riolita Romero reportadas ambas por Alaniz-Álvarez *et al.* (2001, 2002), así como por la ignimbrita oligo-miocénica que aflora al norte de la Cd. de Querétaro para la que Aguirre-Díaz y López-Martínez (2001) determinaron una edad de 20.3 Ma. Las rocas silícicas que se encuentran por debajo de la unidad anterior (To AB) han sido correlacionadas con la Riolita Chichindaro (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001).

En la unidad Tmm AB se agrupan los basaltos que descansan sobre secuencias de rocas tobáceas de composición riolítica a dacítica, en derrames diferenciados por una base de brecha de contacto reportada frecuentemente como “tezontle” (pozos 624, 725, 910, 957-A, 993, 1428, 1954, 1707, 1930, 1973). En la mayoría de los casos, esta unidad se encuentra en la base o intercalada dentro de la unidad Tom Py Lac. En superficie, rocas con esta posición estratigráfica afloran en la unidad Andesita y Basalto La Joya reportada por Valdez-Moreno *et al.* (1998) como proveniente de los estratovolcanes Palo Huérfano, La Joya y San Pedro, localizados al noroeste del Valle de Querétaro. Las edades reportadas para esta unidad varían de 12.4 Ma para el volcán Palo Huérfano (Pérez-Venzor *et al.*, 1996) a 9.9 para el

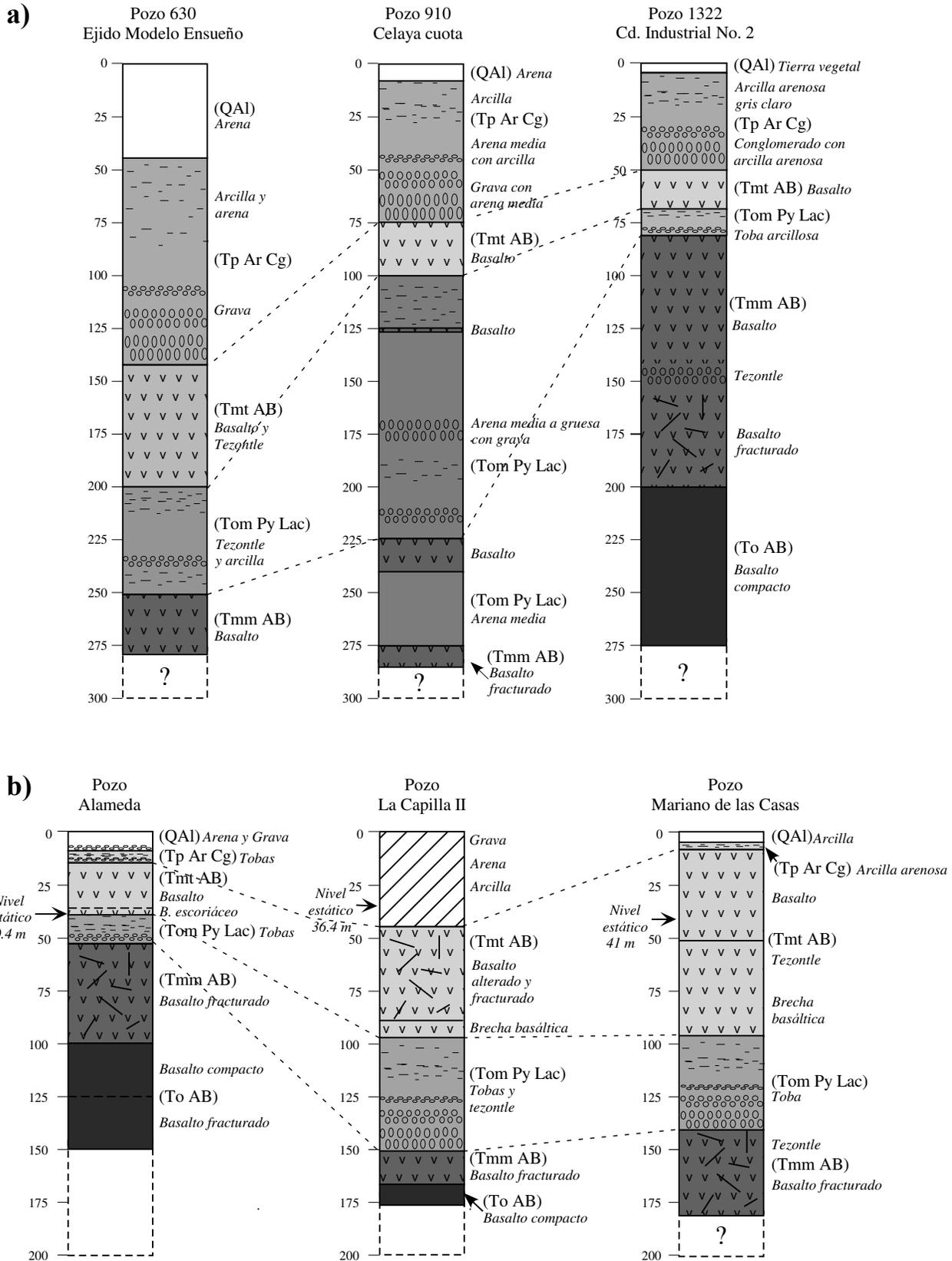


Figura 3. Ejemplos de la interpretación de registros litológicos de pozos de extracción de agua. a) Pozos 630, 910 y 1322 que ejemplifican la variación en el espesor de la secuencia sedimentaria Tp Ar Cg, que rellena el valle. b) Pozos reportados por Trejo-Moedano (1989) representativos de la zona urbana de Querétaro. Se muestra el nivel estático del agua subterránea en 1986. c) Interpretación de los pozos profundos (>50 m) perforados en la zona del Valle de Querétaro. La clave de la estratigrafía se detalla en el texto.

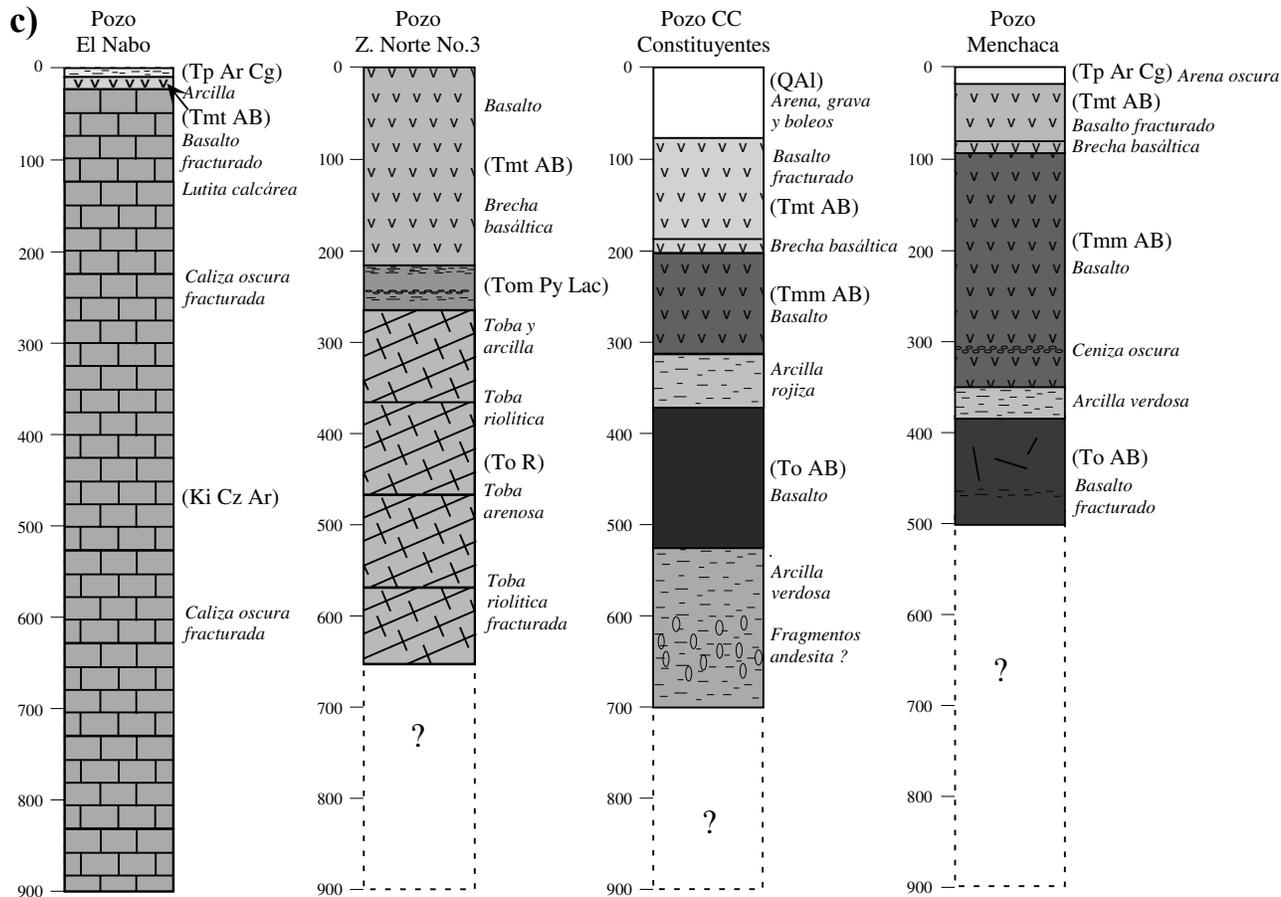


Figura 3. Continuación.

volcán La Joya (Valdez-Moreno *et al.*, 1998).

En el registro litológico de pozos se interpreta una secuencia de tobas, gravas, arenas y arcillas medianamente consolidados con abundantes materiales piroclásticos (Tom Py Lac) intercalados con las formaciones volcánicas (Andesitas y Basaltos) que los sobreyacen y subyacen. Esta unidad se encuentra presente en la mayoría de los registros litológicos interpretados. El espesor promedio es de 50 m y destaca el registro de 200 m de espesor, desde 120 a 320 m de profundidad en el pozo 963. Pozos con alrededor de 200 m de profundidad ubicados en los flancos del graben terminan comúnmente en esta unidad (por ejemplo, pozos 660, 828, 954, 955, 1229, 1312, 1411). En superficie afloran principalmente en la base de las fallas con orientación norte-sur; en los bancos de material ubicados en la carretera libre a Celaya al SW del área de estudio; en la Terminal de Autobuses; y en las partes altas del flanco oriental del graben. Esta secuencia corresponde a la unidad Volcanoclásticos Querétaro reportada por Alaniz-Álvarez *et al.* (2001) compuesta de pómez de color claro intercalada con estratos arenosos, arenisca interestratificada con limonita y tobas de caída libre con fragmentos de pómez de color oscuro.

La unidad Tmt AB está constituida por rocas volcánicas basálticas que afloran como derrames fisurales, aparatos centrales y conos cineríticos. Esta unidad es característica de las mesetas que rodean el Valle de Querétaro (López-Hernández, 1996; Pasquarè *et al.*, 1991) y puede ser identificada en la mayoría de los registros litológicos. La posición estratigráfica de lavas de esta unidad se observa claramente en los registros de los pozos 579-A, 593, 596, 605, 612, 627, 630, 870, 910, 954, 957-A, 963, 966-A, entre otros. Generalmente presentan en la base una brecha volcánica asociada. Los trabajos más recientes asignan una edad del Mioceno Tardío (Alaniz-Álvarez *et al.* 2001, 2002; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001) y de esta manera, la diferencian de rocas más antiguas de composición similar, principalmente de la Andesita y Basalto La Joya del Mioceno Medio. Las edades reportadas para esta unidad son de 8.1 Ma en las cercanías del aeropuerto de la ciudad (Pasquarè *et al.*, 1991), de 7.5 Ma al norte de la misma, 5.6 Ma en el cerro El Cimatario (Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2001) y de 6.2 Ma en la zona del volcán La Joya (Valdez-Moreno *et al.*, 1998).

La unidad que rellena el valle (Tp Ar Cg) consiste de una secuencia sedimentaria de conglomerados, gravas,

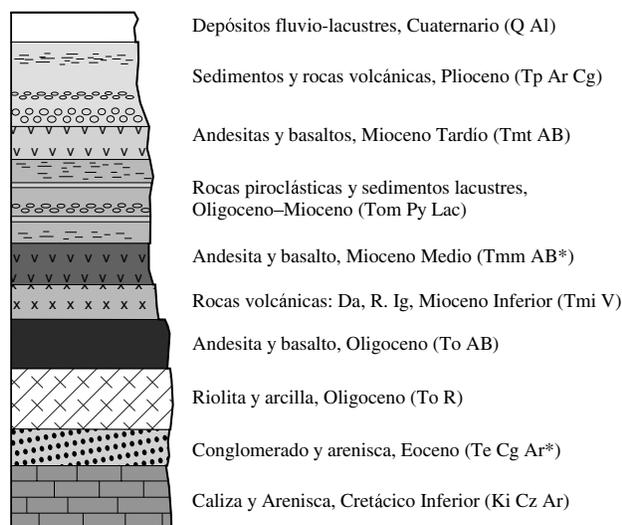
arenas, limos y arcillas, normalmente graduada. Dentro de esta secuencia se encuentran intercalados algunos horizontes delgados de rocas piroclásticas de composición silícica que se han observado en trincheras realizadas en la zona urbana. La secuencia varía entre 20 y 150 m de espesor, con espesores mayores a 100 m en los pozos del centro del graben (pozos 605, 627, 630, 989, 1003, 1817-A). Los espesores menores (20 m) se observan en pozos en los flancos del valle (por ejemplo, pozo 1298). Las secuencias arcillosas de la parte superior confinan hidrogeológicamente a las secuencias de gravas y conglomerados de la parte inferior. Estas últimas inician en la parte central del Valle por debajo de los 4 m de profundidad con una secuencia de limos y arcillas de plasticidad media, sobre la que se desplanta gran parte de la infraestructura urbana de la Ciudad de Querétaro. Esta secuencia tiene una gran importancia en el sistema de flujo de agua, debido a que la parte superior constituye la actual zona vadosa o no saturada, mientras que en la parte inferior se ubicó el nivel principal de extracción de agua entre los años 1970 y 1990.

Por último, en la zona urbana del Valle de Querétaro el primer metro de la secuencia está generalmente constituido por relleno antropogénico. Por debajo de este relleno se localiza un depósito de arcillas de origen lacustre, de color oscuro y alta plasticidad, llamado localmente “capa de tierra negra” con espesores variables entre 1 y 6 m (Trejo-Moedano, 1989). Entre los 8 m (pozo 630) y 40 m de profundidad se localiza una secuencia arenosa, con estratos de gravas con espesores que varían entre 10 y 80 cm. Hacia los márgenes del Valle y en zonas cercanas a cauces de drenaje superficial se localiza el aluvión cuaternario (Q Al),

propriadamente dicho, y depósitos de coluvión (por ejemplo pozo 759) en las zonas de cambio abrupto de pendiente.

Estructuras principales del Valle de Querétaro

La zona del Valle de Querétaro se encuentra afectada por dos sistemas de fallas ortogonales con orientación aproximada N-S y E-W. El sistema E-W comenzó su actividad durante el Oligoceno y se ha propuesto que ambos sistemas han tenido actividad desde el Mioceno en escala regional (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). La interacción entre estos dos sistemas de fallas en la zona de Querétaro define un arreglo de bloques con desplazamientos normales diferenciales, que produce una fosa con mayor profundidad hacia el centro del valle (CEA y UAQ, 2002). La configuración actual del graben de Querétaro se encuentra mejor definida por el sistema con orientación N-S, aunque es clara la presencia de fallas E-W en las partes altas alrededor del valle (ver Alaniz-Álvarez *et al.*, 2002). Por otro lado, la presencia de ambos sistemas de fallas ha sido interpretada en el centro del valle a partir de estudios geofísicos: audio-magnetotelúrico (AMT), gravimetría y magnetometría (CEA y UAQ, 2002). Estos autores interpretan que la continuidad lateral del acuífero no se encuentra afectada por las fallas E-W. En contraste, la planicie del valle se encuentra afectada de manera conspicua por fracturas y fallas con desplazamientos normales que presentan una orientación N-S. En particular, la Falla Central es un sistema de fracturas y fallas con desplazamiento normal que afecta la zona urbanizada del valle, tiene una orientación general N-S, y une dos segmentos de falla que cortan rocas volcánicas en los flancos norte y sur del valle (Figura 1). En su parte norte es un rasgo lineal que registra desplazamientos que varían desde algunos centímetros hasta casi dos metros. Hacia el sur del Cerro de las Campanas, la Falla Central presenta un cambio de dirección hacia el oeste y las fracturas se distribuyen en dos zonas paralelas y discontinuas que conforman un estructura en forma de abanico. La diferencia de elevación de los basaltos observada en los registros litológicos a ambos lados de la Falla Central y las secciones geológicas disponibles, sugieren que la Falla Central refleja la influencia en el relleno sedimentario de un escarpe de falla sepultado. A partir de las variaciones laterales de las unidades estratigráficas interpretadas en perfiles de Radar de Penetración Terrestre se ha identificado que el sistema de fracturas que afecta el valle tiene desplazamientos consistentes con las fallas regionales (Cerca y Carreón-Freyre *et al.*, 2003; Carreón-Freyre y Cerca, 2003; Carreón-Freyre y Cerca, 2004). Un ejemplo de las secciones interpretadas es el perfil esquemático de dirección E-W presentado en la Figura 5, que cruza la parte media del valle. La identificación de la distribución de unidades estratigráficas y de las estructuras sirve como fundamento para definir al sistema acuífero del Valle de Querétaro como un sistema de compartimentos con complejos patrones de flujo (Mayo y Koontz, 2000).



* Unidades ubicadas en los cortes litológicos, no afloran en superficie

Figura 4. Columna estratigráfica esquemática del Valle de Querétaro que muestra las principales unidades litológicas interpretadas a partir de los registros de pozos y adaptada a la columna de la zona reportada por Alaniz-Álvarez *et al.* (2001). Da: dacita, R: riolita, Ig: ignimbrita.

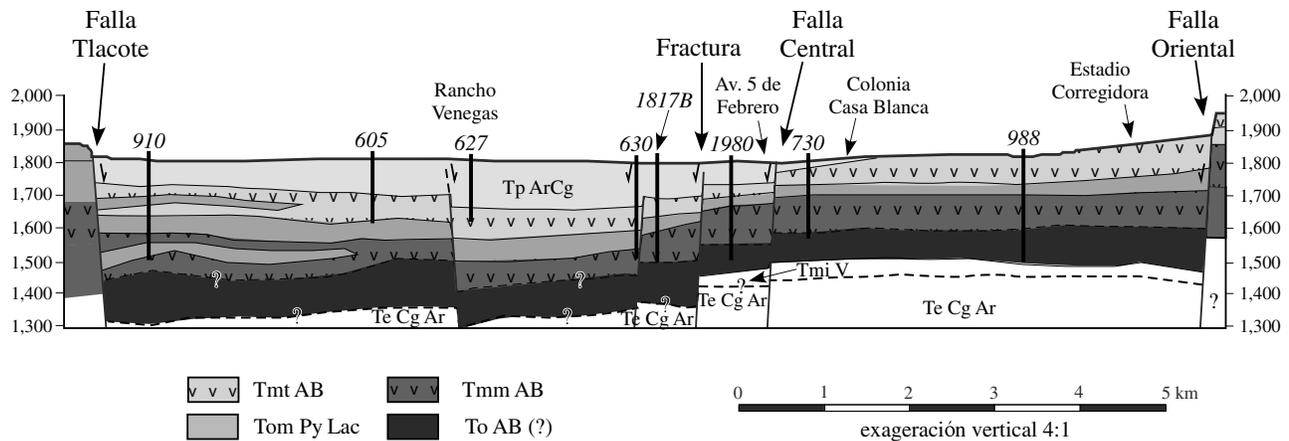


Figura 5. Sección geológica, esquemática e idealizada, con dirección oeste-este interpretada a partir del registro litológico con profundidades menores a 500 m. La localización de la sección se muestra en la Figura 2.

Modelo conceptual del funcionamiento del acuífero del Valle de Querétaro

La secuencia del Valle de Querétaro se ha conceptualizado como un acuífero granular compuesto por materiales sedimentarios y materiales volcánicos intercalados (CNA, 1996; CEA y UAQ, 2002, CNA, 2003). Estos últimos pueden constituir un basamento o un acuífero de acuerdo a su grado de fracturamiento (CNA, 1996). De esta manera, el sistema del Valle de Querétaro ha sido definido como un acuífero del tipo libre o semiconfinado, de permeabilidad baja a media (CEA y UAQ, 2002; CNA, 2003). Estas aseveraciones pueden ser discutidas porque implican una simplificación de las características físicas de los materiales. Algunas simplificaciones que se han generalizado en relación a las características hidráulicas de las rocas volcánicas de la zona suponen que: (1) las rocas volcánicas interestratificadas en la secuencia sedimentaria presentan un alto grado de fracturamiento y constituyen un acuífero fracturado; (2) las rocas volcánicas en la base de la cuenca son masivas y pueden ser consideradas un basamento hidrogeológico; y (3) las rocas volcánicas fracturadas localizadas en las partes altas de los alrededores del Valle de Querétaro privilegian la infiltración por lo que gran parte de ellas es considerada como zona de recarga del sistema acuífero. Estas aseveraciones son cuestionables sin el marco hidrogeológico adecuado debido a que es difícil estimar por métodos indirectos el grado de fracturamiento o la conductividad hidráulica de una determinada unidad estratigráfica. Por ejemplo, la presencia de brechas volcánicas de contacto o “tezontle” no necesariamente indica una alta permeabilidad; y el “basamento” tampoco es necesariamente masivo, sino que está afectado por sistemas de fracturas regionales que pueden tener una influencia importante en las condiciones de flujo del sistema. Las capas sedimentarias con alto contenido de limo y arcilla funcionan como acuitardos que confinan localmente unidades acuíferas, y el gran espesor de

la zona no saturada (mayor que 100 m) determina retardos importantes en el flujo subterráneo del agua infiltrada, antes de llegar a recargar al acuífero.

La evaluación directa de los parámetros hidráulicos de estas rocas (conductividad hidráulica, K ; gradiente hidráulico, i ; y coeficiente de almacenamiento, S) es fundamental para la determinación de condiciones de flujo y disponibilidad del recurso hídrico. Con datos de las pruebas de bombeo que se utilizan para la caracterización en campo de la conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento, sólo se puede estimar el comportamiento global del sistema sin considerar la influencia de cada unidad hidroestratigráfica, independientemente del método de análisis utilizado. Las pruebas de bombeo realizadas en el Valle de Querétaro se han interpretado con los métodos de Theis, Cooper y Jacob, y Hantush (CEA, 1993, CNA, 1996; CEA y UAQ, 2002). Los dos primeros métodos (Theis, 1935; Cooper y Jacob, 1946) se utilizan en la evaluación de acuíferos confinados, homogéneos e isótropos, además de otras condiciones geométricas del acuífero; mientras que el tercer método (Hantush, 1956 y 1960) ha sido diseñado para acuíferos que, además de ser homogéneos e isótropos, están confinados en su parte superior por un acuitardo con aporte por goteo, el cual podría aplicarse localmente en el caso del valle (si se considera que las formaciones arcillosas superiores se encuentran en condiciones no saturadas). La interpretación de estas pruebas de bombeo tiene otras limitaciones que incluyen: (1) solo se han realizado pruebas en pozos localizados en la planicie del valle; (2) el intervalo ranurado de la columna de ademe utilizada es tan amplio que no permite el control estratigráfico del medio a evaluar; y (3) la distribución de la red de pozos de extracción en el valle dificulta evaluar la influencia que tiene el bombeo de los pozos adyacentes y la respuesta hidráulica de la zona de prueba.

Para la elaboración del modelo conceptual del funcionamiento del acuífero propuesto en este trabajo, se

integró la información estratigráfica extraída de los registros de pozos, la cartografía de la geología superficial y el levantamiento de unidades estructurales, con la historia de abatimiento del nivel piezométrico en los pozos disponibles. De acuerdo con las propiedades físicas que se pueden atribuir a las diferentes unidades estratigráficas, el modelo del acuífero del Valle de Querétaro propuesto en este trabajo es del tipo multicapa (Ruud y Kabala, 1997; Hemker, 1999a; Chen, 2002) con un sistema de flujo inferido entre local y regional. De acuerdo con la definición de estos autores, en un acuífero multicapa ocurren fuertes contrastes de conductividad hidráulica principalmente en la dirección vertical. Este es el caso de la secuencia de capas limo-arcillosas, conglomerados, rocas masivas y rocas volcánicas fracturadas del Valle de Querétaro. Además, habría que considerar que la heterogeneidad es también originada por variaciones locales en el almacenamiento específico, que depende de la estructura y porosidad de cada material, y que varía de acuerdo al registro sedimentario de la cuenca (el análisis de los registros de pozos como los que se muestran en la Figura 3, indica la presencia de espesores importantes de materiales intercalados de grano fino y grueso). Se han reportado valores de conductividad hidráulica (K) que varían de 0.032 a 1.0 m/día y de 0.08 a 40 m/día, y de transmisividad (T) de 0.2×10^{-3} y 0.8×10^{-3} m²/día, para los medios granular y fracturado respectivamente (CNA, 1996). Con respecto al coeficiente de almacenamiento (S) el mismo estudio reporta un valor de 7% evaluado con base en el balance hidráulico, y de 0.005% mediante prueba de bombeo. Estas variaciones indican que es necesario un nuevo análisis de los datos, en el contexto de un arreglo geométrico que permita evaluar el grado de incertidumbre en la estimación de estos parámetros. El establecimiento del modelo multicapa (Hemker, 1999b; Chen, 2002), se basa entonces en la importante influencia de las características litológicas y de las condiciones estructurales del medio (fallas y fracturas principalmente) que se evidencia por la alta variación de valores de conductividad hidráulica y almacenamiento específico reportados a partir de pruebas de bombeo.

A partir de la correlación de las unidades estratigráficas con la evolución piezométrica del sistema, se identificaron seis unidades hidroestratigráficas: (1) un acuitardo superficial que corresponde a la parte superior de la secuencia Tp Ar Cg; (2) una unidad acuífera granular somera que corresponde a la base de la misma secuencia, con muy amplia distribución en la parte centro y poniente del valle; (3) unidad acuífera fracturada somera, formada por los derrames de lava (Tmt AB), con presencia de fracturas e intercalaciones de material piroclástico; esta es una unidad acuífera libre en la periferia y semiconfinada en la parte baja del valle; (4) unidad acuífera granular intermedia, corresponde a la unidad Tom Py Lac, ampliamente distribuida en el área entre la Zona Industrial y Juriquilla; (5) unidad acuífera fracturada intermedia, compuesta por rocas volcánicas (Tmm AB, ToAB y Tmi V) que se encuentran localmente fracturadas;

(6) unidad acuífera granular inferior, corresponde a la secuencia sedimentaria Te Cg Ar.

Evolución piezométrica y evaluación de las condiciones de recarga

En lo que se refiere al establecimiento de las condiciones de flujo en el sistema regional, los datos de piezometría sugieren que el agua subterránea confluye hacia el Valle de Querétaro considerado como una zona de descarga (CEA y UAQ, 2002; CNA, 2003). La modelación de las entradas subterráneas en estudios previos (CNA, 1996) indica que los acuíferos adyacentes aportan aproximadamente 38 millones de m³/año. Existen en el valle alrededor de 304 aprovechamientos activos que explotan agua subterránea entre 70 y 300 m de profundidad (CEA y UAQ, 2002) y los balances indican que se extrae entre 2.3 y 2.8 veces más de lo que se recarga (CNA, 1996; CEA y GEQ, 1999; CEA y UAQ, 2002, CNA, 2003).

Para evaluar las condiciones de flujo local-regional, en este trabajo se integraron las mediciones piezométricas de pozos de monitoreo y los datos de niveles piezométricos de pozos medidos entre los años de 1970 y 2003. Se interpolaron los valores piezométricos utilizando un método lineal para dos escenarios diferentes: medio homogéneo y medio discontinuo (Figura 6). El análisis de las configuraciones del nivel piezométrico para un medio homogéneo permite inferir un sentido de flujo del agua subterránea preferentemente del NE y del NW hacia el centro del Valle de Querétaro y hacia el Valle de Apaseo, en Guanajuato (Figuras 6a y 6b). A partir de la distancia relativa entre las isolíneas se puede inferir que en las mesas altas se tienen valores del gradiente hidráulico bajos; mientras que en las laderas se tienen valores de gradientes hidráulicos altos. En la planicie del valle predominan valores de gradiente hidráulico pequeño (Figura 6). Las variaciones de las isolíneas hacia el área entre la Zona Industrial y Jurica, que delimitan la geometría de la sierra en El Salitre, sugieren un aporte de flujo de agua subterránea de la parte alta hacia estas localidades. En este contexto, las zonas de recarga por infiltración superficial se ubicarían en las sierras al norte y al sur del Valle, y en la zona de la Cañada. El flujo en las partes altas tiene una fuerte componente horizontal con una dirección hacia el centro del valle, cuya zona de tránsito podrían estar asociada con las capas de rocas volcánicas fracturadas como sugieren los gradientes hidráulicos obtenidos para el año 2002 (Figura 6b). La continuidad de las isolíneas piezométricas en estas configuraciones no permitió distinguir una frontera hidráulica horizontal ni vertical. Los datos obtenidos en el año 2002 indican que la carga hidráulica disminuye desde 1,980 m en la parte norte hasta 1,660 m en el centro del Valle de Querétaro. Esta observación apoya la idea del flujo general del agua subterránea en esta dirección. Comparando estos resultados con las configuraciones piezométricas registradas en el año de 1990, se puede calcular un valor

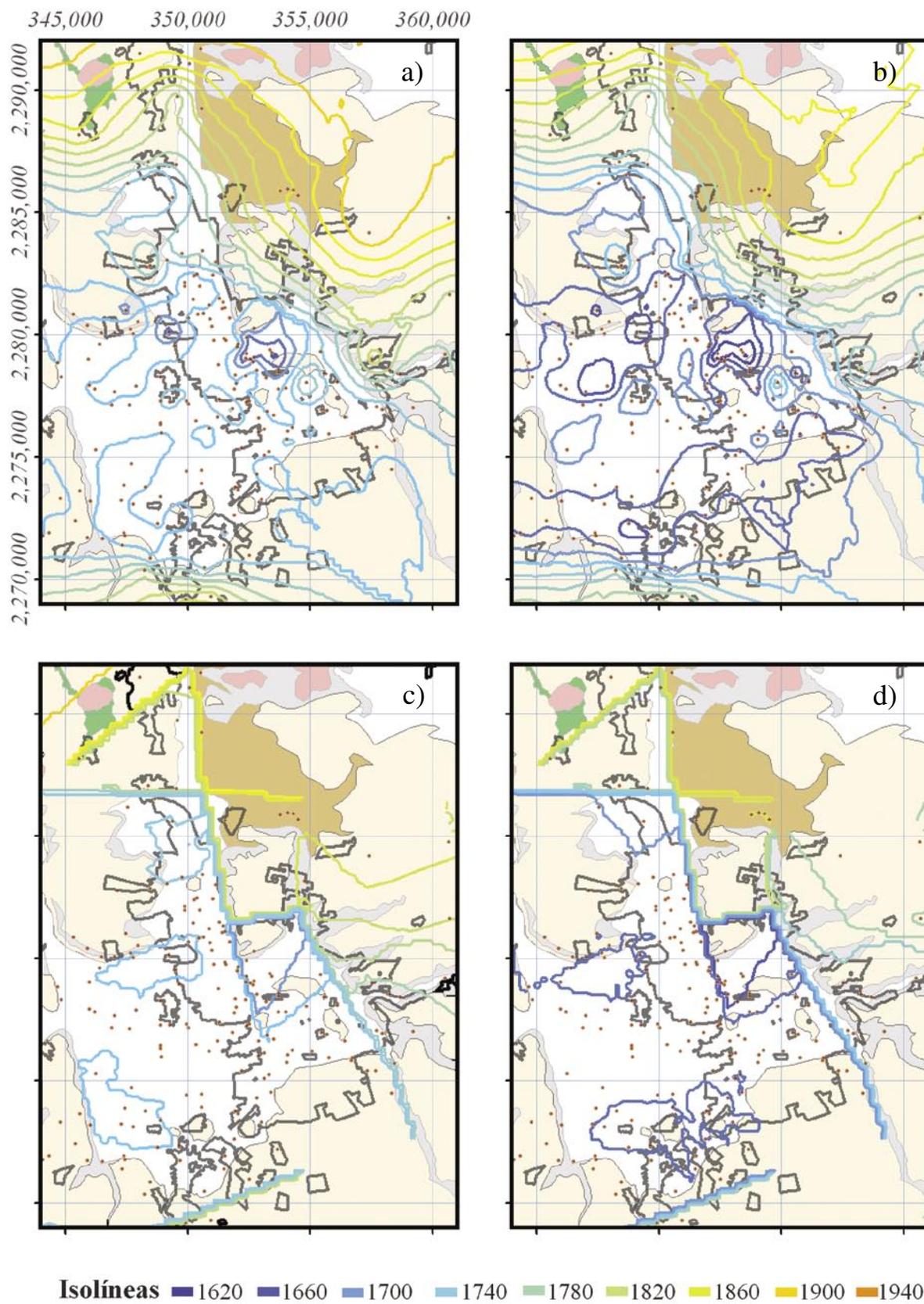


Figura 6. Evolución piezométrica considerando un modelo lineal para un medio homogéneo para los años de (a) 1990 y (b) 2002, y para un medio discontinuo tomando como fronteras de interpolación las fallas y fracturas reportadas, usando los datos de (c) 1990 y (d) 2002. El análisis de las configuraciones utilizando un medio discontinuo sugiere que las estructuras tienen una influencia importante en el flujo de agua y delimitan zonas con abatimientos mayores most□

aproximado del abatimiento de la carga hidráulica de 3.6 m/año, consistente con el valor reportado por CEA y GEQ (1999). Sin embargo, los abatimientos críticos alcanzan valores entre 4 y 6.6 m/año. Hacia las partes altas de las sierras, la evolución del nivel piezométrico estimado es de menos de 2 m/año. Este descenso de la carga hidráulica es manifestado por la disminución en la distancia entre isolíneas y por su retroceso progresivo hacia las partes altas. La configuración de los valores de la carga hidráulica calculados para el año de 2002 muestra que los valores mínimos varían entre 1,640 y 1,680 m, y se localizan en la parte norte del centro de la ciudad de Querétaro. Las isolíneas de los valores mínimos (1,680 m) se encuentran

distribuidas entre la Zona Industrial y el poblado de la Colmena (falla Tlacote), en el sur del valle desde la Terminal de Autobuses hasta los límites del poblado El Romeral con una orientación este-oeste; y en la parte norte de la ciudad de Querétaro (ver localización en Figura 2).

En un segundo escenario, se realizó una interpolación lineal de los valores piezométricos considerando un medio discontinuo (Figuras 6c y 6d). Para este caso se utilizaron las trazas de las fallas y fracturas observadas en la superficie del Valle de Querétaro como límites de interpolación. La configuración de isolíneas de la carga hidráulica para el mes de diciembre de los años de 1990 y 2002, sugiere que existe una influencia importante de las fallas en el flujo de agua

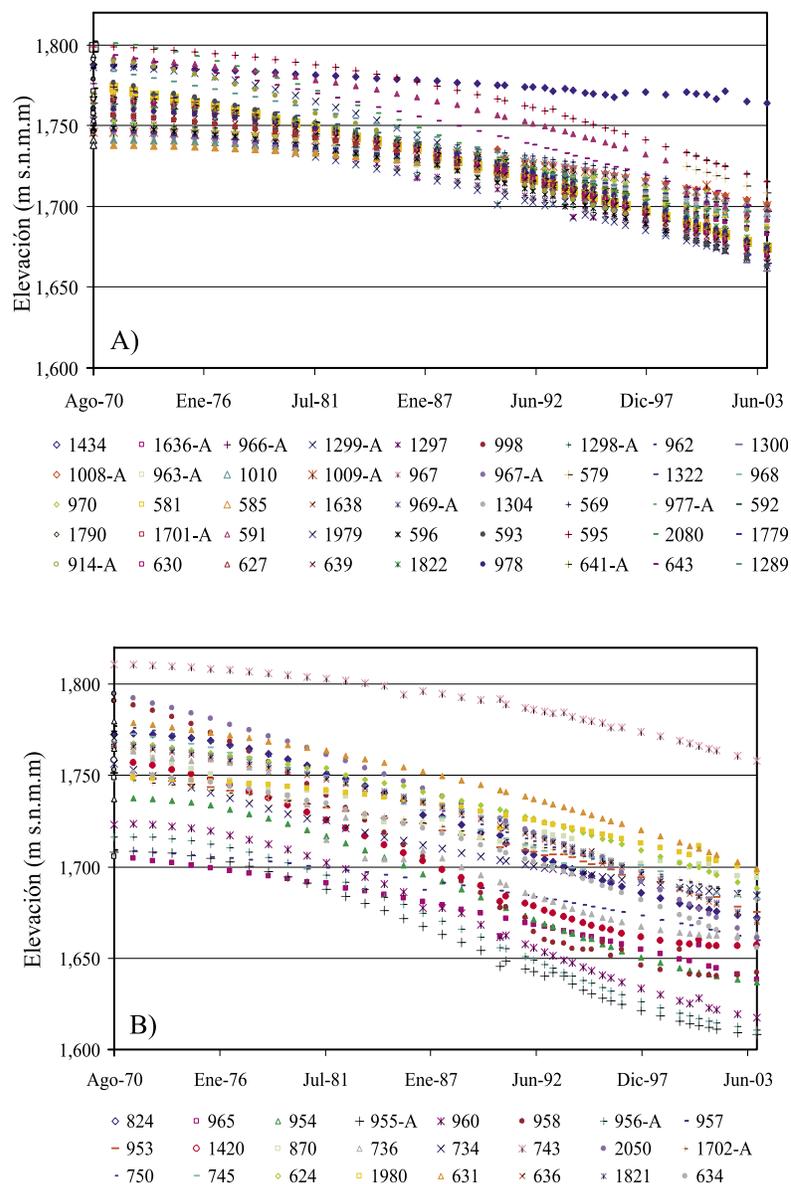


Figura 7. Comportamiento del descenso del nivel piezométrico en pozos con elevaciones de brocal entre 1,800 y 1,820 m sobre el nivel del mar y ubicados en un radio menor que 2.5 km de la Falla Central: (a) 45 pozos en la zona del valle al poniente de la Falla Central, y (b) 24 pozos al oriente de la Falla Central. Ver figura 2 para la localización de los pozos. La información piezométrica fue interpolada a partir de los datos disponibles.

subterránea (Figuras 6c y 6d). Una evidencia es la presencia de conos de abatimiento aparentemente delimitados por las trazas superficiales de las fracturas. Los registros de descenso piezométrico contra tiempo obtenidos de pozos localizados a menos de 2.5 km de la Falla Central y con elevaciones de brocal entre 1,800 y 1,820 m, muestran un comportamiento diferente entre las zonas al poniente y al oriente de la falla (Figura 7). En los registros de 69 pozos localizados en el valle entre 1,800 y 1,820 m de elevación y en una franja de 2.5 km a ambos lados de la traza de la Falla Central, la tendencia general de descenso progresivo del nivel piezométrico presenta un comportamiento lineal. Sin embargo, algunas diferencias significativas pueden observarse en el comportamiento del descenso a ambos lados de la falla. El grupo de 45 pozos localizados al poniente de la Falla Central (Figura 7a) presenta una disminución uniforme con niveles entre las elevaciones de 1,740 y 1,800 m para el año de 1970 y entre 1,660 y 1,720 m para el año 2003. Aún cuando existen varios pozos localizados muy cerca de la traza de la Falla Central, solamente el pozo 1434 presenta una carga hidráulica casi constante, lo que puede indicar que la Falla no necesariamente tiene el mismo comportamiento hidráulico a lo largo de toda su traza. En contraste, las variaciones en la disminución progresiva son mayores en un grupo de 24 pozos localizados al oriente de la Falla Central (figura 7b). En este grupo de pozos se pueden delinear dos tendencias diferentes: la primera presenta cambios de elevación similares al comportamiento en la zona poniente; mientras que la segunda tendencia corresponde a un grupo de registros que presenta un descenso más acentuado entre los años 1981 y 1992. Aunque este comportamiento puede estar asociado a una mayor extracción en una zona

de uso industrial, es interesante notar que no se identifica esta mayor tasa de abatimiento en los pozos cercanos del lado poniente de la falla para el mismo período. Esta evidencia sugiere la idea de que la Falla Central puede actuar en algunas zonas como una frontera que delimita comportamientos hidráulicos independientes dentro de la secuencia sedimentaria.

Contrario a lo esperado, los abatimientos mayores se encuentran en el bloque elevado de la falla. Los pozos adyacentes que se encuentran en el bloque hundido al otro lado de la falla no presentan variaciones en el descenso piezométrico que indiquen una influencia del cono de abatimiento (Figura 7a). Esta diferencia sugiere que la falla actúa como una frontera de flujo. Cabe señalar que la densidad de pozos localizados en el valle (entre 1,800 y 1,820 m de elevación) y en un radio menor que 2.5 km a ambos lados de la falla es similar. En la zona oriental, el pozo 743 (Figura 7b) muestra una tasa de abatimiento menor, probablemente asociada a recarga superficial en el Río Querétaro.

La temperatura en el agua subterránea en promedio se encuentra alrededor de los 30° C, aunque temperaturas mayores a 35 °C fueron reportadas por CEA y UAQ (2002) en los pozos Menchaca 1 y Santa Maria 4. A partir de las mediciones en campo de muestras de agua subterránea, se registró un aumento en la conductividad eléctrica desde 400 $\mu\text{mhos/cm}$ en la periferia del valle hasta 850 $\mu\text{mhos/cm}$ en la parte baja del valle y en las cercanías del poblado de Jurica y El Salitre. El aumento en la concentración de iones mayores en solución en el agua subterránea a favor del gradiente hidráulico, sugiere que se están explotando sistemas de flujo de mayor profundidad. Además, las capas

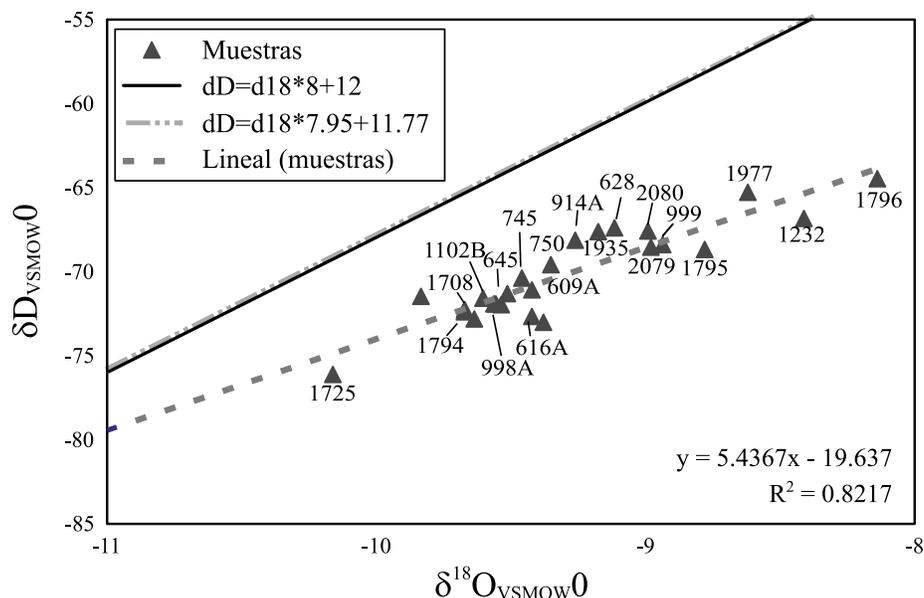


Figura 8. Gráfica de $\delta^{18}O$ contra δD . La línea del agua meteórica (línea sólida) es el resultado de la agrupación de las líneas meteóricas mundial (Craig, 1961), regional (Cortés et al., 1997) y local (CEA y UAQ, 2002). La diferencia en la tendencia de las muestras analizadas (línea punteada) sugiere que el agua subterránea en el valle no proviene directamente de la recarga vertical.

sedimentarias con alto contenido de limo y arcilla que se encuentran por encima del nivel piezométrico dentro de la zona no saturada (mayor a 100 m), influyen en el retardo de la recarga del sistema acuífero del valle.

Una parte importante de este trabajo es la utilización de los modelos geológico e hidrogeológico para evaluar las condiciones de recarga del sistema acuífero. Sin embargo, con los datos disponibles actualmente todavía no es posible estimar cuantitativamente la recarga. En trabajos previos, la recarga se ha estimado a partir de las fluctuaciones de las líneas piezométricas, suponiendo que la variación de la carga hidráulica se debe sólo a la extracción de agua subterránea y a una recuperación por recarga vertical inmediata. Además, no se conoce la incertidumbre en valores reportados de volúmenes de extracción de agua subterránea ni la contribución de las componentes vertical y horizontal de los valores de recarga (Carrillo-Rivera *et al.*, 1996; Carrillo-Rivera, 2000).

La idea de que la recarga por infiltración superficial en el valle es prácticamente nula, es apoyada por los resultados del análisis de los isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y δD presentados en la gráfica de la Figura 8. En esta figura, la línea meteórica es el resultado de la agrupación de la línea meteórica mundial (Craig, 1961), con la línea meteórica regional (Cortés *et al.*, 1997) y la línea meteórica local (CEA y UAQ, 2002). Los valores determinados en este trabajo definen una línea con una pendiente de 5.4 y un coeficiente de correlación aceptable (0.82), la cual se encuentra por debajo de la línea de agua meteórica. Las diferencias isotópicas entre el agua meteórica y subterránea sugieren que el agua subterránea en el valle no proviene directamente de la infiltración y recarga vertical, al menos en un periodo de tiempo corto. Además del intercambio isotópico con el medio acuífero, el comportamiento diferente puede ser debido a la evaporación bajo las condiciones climáticas previas a la infiltración en aguas antiguas (Mazor, 1991) o mezclas con cuerpos de agua de origen no meteórico (CEA y UAQ, 2002). Los valores mínimos de $\delta^{18}\text{O}$ y δD corresponden a muestras colectadas en pozos ubicados en las zonas topográficamente altas (Figura 8) y aumentan hacia las partes bajas. De acuerdo a estos resultados, las zonas probables de recarga se ubicarían en los alrededores del Cerro Grande de Santa Cruz y Cerro Chato ubicados al norte de la ciudad de Querétaro; en las proximidades del Cerro Prieto al noreste de la zona de estudio; en las mesetas de basalto ubicadas al este de la ciudad de Querétaro; y en el Cerro El Cimatario y la serranía (C. El Tangano) que se extiende hacia su lado suroriental. Para realizar evaluaciones precisas de la recarga debida a la precipitación es importante estimar el tiempo de residencia del agua en el acuífero, con el fin de ubicar en el tiempo su entrada al sistema y las implicaciones en el flujo subterráneo.

En la Figura 9 se muestran configuraciones del descenso de la carga hidráulica para intervalos de 10 años desde 1970 hasta 2002. En cada intervalo de tiempo aparecieron equipotenciales de menor valor principalmente en la Zona

Industrial de la ciudad de Querétaro, y al suroeste en las proximidades del poblado de Santa María Magdalena. Durante el intervalo de diciembre de 1990 a diciembre de 2002, se registraron los máximos abatimientos que ha tenido el valle. El 85% del total del área tuvo abatimientos mayores que 20 m. En la figura 9d se muestra el descenso acumulado durante los 32 años estudiados (1970-2002). El descenso del nivel piezométrico define zonas de abatimiento crítico que se han mantenido más o menos constantes durante este periodo, así como zonas amplias con un comportamiento homogéneo. La carga hidráulica ha disminuido en el área de estudio entre 10 y 160 m, y en la parte baja del valle se han experimentado los mayores descensos. Sin embargo, la evolución del nivel piezométrico en el valle ha sido diferencial. Se infiere que estas variaciones están delimitadas por discontinuidades estructurales como se mencionó anteriormente. Los máximos descensos se han observado en el poblado de Las Adjuntas, en los límites con el estado de Guanajuato; en la Zona Industrial; en la Cañada; y al sureste de la ciudad de Querétaro en las cercanías de la Terminal de Autobuses; con descensos de nivel piezométrico de 160, 140, 150 y 140 m, respectivamente. Los menores descensos se observan al norte del poblado El Pueblito; al oeste de la ciudad de Querétaro en alineación con la Falla Central; y en la localidad de Santa María Magdalena, con valores de 50 m las dos primeras y de 60 m en la última. En general, los descensos de la carga hidráulica menores que 60 m se tuvieron en las partes perimetrales del área de estudio, que corresponden a las zonas de mayor altitud.

CONCLUSIONES

En este estudio se analizaron los registros litológicos y de piezometría de pozos de aprovechamiento de agua ubicados en la mitad oriental del Valle de Querétaro. La correlación entre la estratigrafía y las configuraciones de los descensos en el nivel piezométrico, permiten proponer un modelo multicapa para el acuífero del Valle de Querétaro, con un sistema de flujo intermedio entre local y regional. El flujo de agua subterráneo está influenciado por el contraste en las propiedades hidráulicas de los diferentes materiales sedimentarios y por las discontinuidades estructurales (fallas y fracturas). Estas estructuras son consistentes en dirección y cinemática con los dos sistemas de fallas regionales (con orientación N-S y E-W).

Las diferencias en el comportamiento piezométrico observado en hidrógrafos y analizados en ambos lados de la Falla Central sugieren que esta estructura actúa como una frontera que determina patrones diferentes de flujo del agua subterránea. De esta manera, la distribución espacial de la carga hidráulica y su evolución durante las últimas tres décadas, apoyada con la información de fallas y fracturas permiten delinear compartimentos dentro del sistema acuífero en los que el descenso del nivel piezométrico tiene comportamientos diferentes.

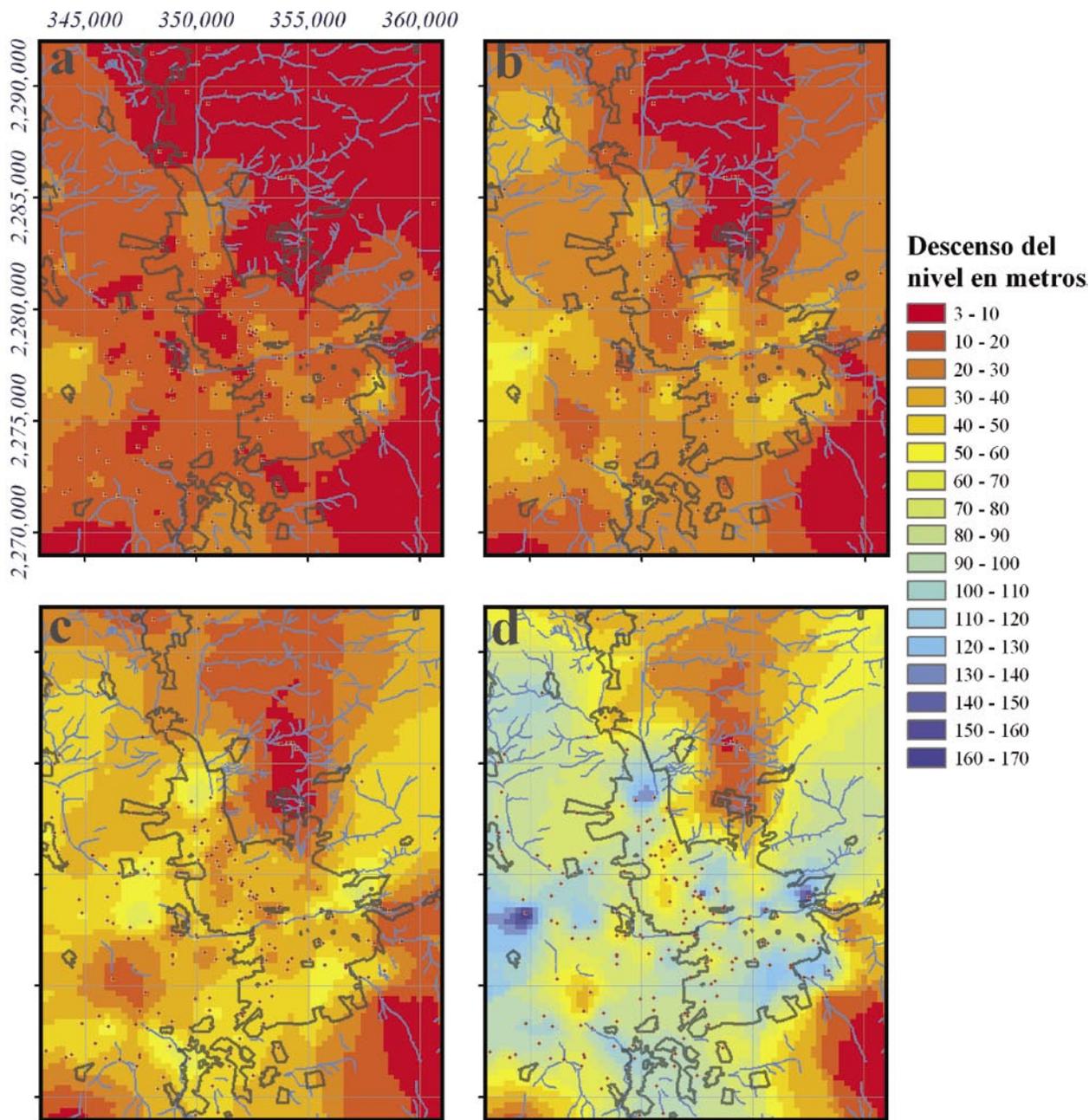


Figura 9. Configuraciones del descenso de la carga hidráulica para intervalos de 10 años desde 1970 hasta 2002: (a) 1970-1980, (b) 1980-1990, (c) 1990-2002. La figura 9d muestra el total acumulado del descenso para el intervalo entre 1970 y 2002. Los polígonos sólidos muestran las zonas urbanas. Las coordenadas en UTM se muestran sólo en la figura 9a.

Del análisis de los cortes litológicos de pozos se puede inferir que el relleno de la cuenca de Querétaro (Tp Ar Cg) registra un depósito continuo y normalmente graduado desde la formación de la cuenca en el Mioceno Tardío – Plioceno. El análisis de la secuencia sedimentaria ayudó a identificar dos paquetes de secuencias fluvio-lacustres terciarias: Tp Ar Cg y Tom Py Lac, divididas por eventos volcánicos. Las unidades sedimentarias con un alto contenido de arcillas y limos finos, que se observan

cerca de la superficie, disminuyen considerablemente la conductividad hidráulica de la secuencia por su alta capacidad de retención de agua. Además, el tiempo de recarga aumenta debido al gran espesor de la zona no saturada y las intercalaciones de rocas volcánicas.

El aumento en la concentración de iones mayores en solución en el agua subterránea sugiere que se están explotando sistemas de flujo más profundos con mayor alcance regional. Además, los resultados de $\delta^{18}\text{O}$ y δD

apoyan la idea de que el agua subterránea en el valle no proviene directamente de la infiltración y/o recarga vertical, al menos en un periodo de tiempo corto.

Finalmente, la integración de un modelo conceptual de flujo con el modelo geológico del subsuelo permitió identificar zonas probables de recarga, así como las unidades hidroestratigráficas que pueden transmitirla. Con los datos disponibles todavía no es posible cuantificar la cantidad de agua que entra al sistema ni la magnitud de las componentes vertical y horizontal de la recarga. Para la continuación de este trabajo es necesario documentar sistemáticamente los parámetros hidráulicos que caracterizan a las unidades hidroestratigráficas identificadas; así como monitorear la evolución piezométrica reciente del sistema de flujo regional, para conocer la interacción con los acuíferos adyacentes que aportan agua subterránea al Valle de Querétaro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Consejo de Ciencia y Tecnología de Querétaro (CONCYTEQ) que financió el desarrollo de esta investigación a través del proyecto Ref. No. 49. M. Cerca agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) que otorgó una beca de doctorado. Agradecemos también el apoyo logístico del Ing. Sergio Loustaunau Velarde, Gerente Estatal en Querétaro de la CNA, y del Centro de Geociencias de la UNAM. Asimismo agradecemos al M. en C. Pedro Morales Puente y a la M. en C. Edith Cienfuegos Alvarado del Laboratorio de Espectrometría de Masas del Instituto de Geología de la UNAM por realizar las determinaciones de isótopos ambientales. Se agradece la valiosa participación del M. en C. Carlos Vargas dentro del proyecto CONCYTEQ y en la interpretación hidrogeológica de los datos piezométricos. La revisión crítica y sugerencias del Dr. Ángel Nieto-Samaniego, de la M. en I. Eloisa Domínguez y de dos árbitros anónimos ayudaron a mejorar en gran medida este trabajo.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G., López-Martínez, M., 2001, The Amazcala Caldera, Querétaro, México; geology and geochronology: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 111, 203-218.
- Aguirre-Díaz, G.J., Zúñiga-Dávila Madrid, R.F., Pacheco, F.J., Guzmán-Speziale, M., Nieto-Obregón, J., 2000, El graben de Querétaro, México; observaciones de fallamiento activo: *GEOS*, 20, 2-7.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A. F., Orozco-Esquivel, M.T., Vasallo-Morales, L.F., Xu, S.S., 2002, El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende; implicaciones en la deformación post-eocénica del centro de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 55, 12-29.
- Alaniz-Álvarez, S.A., Nieto-Samaniego, A.F., Reyes-Zaragoza, M.A., Ojeda-García, A.C., Orozco-Esquivel, M.T., Vasallo, L.F., 2001, Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, 129-148.
- Álvarez-Manilla, A.A., 2000. Modelo del mecanismo de agrietamiento en el Valle y Zona Metropolitana de Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría en Ingeniería, 74 p.
- Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F.W., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining district: *International Geology Review*, 40, 116-134.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., 2004, Delineating the near-surface geometry of the fracture system affecting the Valley of Queretaro, Mexico, *en* Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar: Holanda, Delft University of Technology, v. II, 535-538.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., 2003, Origin and propagation of fracturing in the vulcano-lacustrine basin of Queretaro (resumen), *en* 99th Meeting, Geological Society of America, Cordilleran Section, Puerto Vallarta, Jal., abril 1-3: Geological Society of America, Abstract T10 35-3.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Vargas-Cabrera, C., Luna-González, L. Gámez-González, F.J., Hernández-Marín, M., Álvarez-Rodríguez, J., 2003, Análisis de flujo de agua subterránea en el acuífero del Valle de Querétaro desde el punto de vista geológico (resumen), *en* La investigación y el desarrollo tecnológico en Querétaro: Sustentabilidad del sistema agua en Querétaro, Memorias de Simposio (en CD): Querétaro, Consejo de Ciencia y Tecnología de Querétaro (CONCYTEQ).
- Carrillo-Rivera, J.J., 2000, Application of the groundwater-balance equation to indicate interbasin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico: *Hydrogeology Journal*, 8, 503-520.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona, A., Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México; *Journal of Hydrology*, 185, 23-44.
- Clark, I., Fritz, P., 1997, *Environmental Isotopes in Hydrogeology*: New York, Lewis Publishers, 328 p.
- Cerca-Martinez, L.M., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2000, The geologic evolution of the Southern Sierra de Guanajuato, Mexico; a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review* 42, 131-151.
- Cerca, M., Carreón-Freyre, D., 2003, Geosciences and engineering connections towards the understanding and management of ground fracturing of urban zones of central Mexico: a case study in the Valley of Querétaro (en CD), *en* Proceedings of the 4th Doctoral Students Conference "Science, technology, society, and culture: tools for building the future of the Pacific rim", México, D. F., Agosto 24-29: México, D.F., Association of Pacific Rim Students (APRU).
- Chen, G.J., 2002, Analysis of pumping in multilayered and poro-elastic half space: *Computers and Geotechnics*, 30, 1-6.
- Comisión Estatal del Agua (CEA). 1993. Estudio geohidrológico integral del Valle de Querétaro y sus alrededores para el manejo automatizado de los recursos hidráulicos subterráneos: Querétaro, México, Comisión Estatal del Agua, Reporte de estudio a contrato elaborado por Guysa, 300 p.
- Comisión Estatal del Agua (CEA) y Gobierno del Estado de Querétaro (GEQ), 1999, Plan Hidráulico del Estado de Querétaro; I. Agua Potable y Saneamiento: Querétaro, México, Comisión Estatal del Agua, Gobierno del Estado de Querétaro, 229 p.
- Comisión Estatal del Agua (CEA) y Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), 2002, Estudio integral del recurso agua en los acuíferos del Estado de Querétaro: Querétaro, México, Comisión Estatal del Agua, Universidad Autónoma de Querétaro, Reporte técnico, Tomos I y II, 550 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996, Estudio de Simulación Hidrodinámica y Diseño Óptimo de la Red de Observación de los Acuíferos de Aguascalientes y Querétaro: Querétaro, México, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal Querétaro, Reporte de estudio a contrato elaborado por Guysa, 200 p.

- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2000, Los Recursos Hidráulicos en el Estado de Querétaro: Querétaro, México, Comisión Nacional del Agua, Informe Técnico en formato de presentación, 23 láms.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 2003, Plan de manejo del acuífero Valle de Querétaro: Querétaro, México, Comisión Nacional del Agua, Gerencia Estatal Querétaro, Reporte de estudio a contrato elaborado por Proyectos, Estudios y Sistemas, S.A. de C.V, 200 p.
- Cooper, H.H., Jacob, C.E., 1946, A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history: American Geophysical Union, Transactions, 27, 526-534.
- Cortés, A., Durazo, J., Farvolden, R.N., 1997, Studies of isotopic hydrology of the basin of Mexico; annotated bibliography and interpretation: Journal of Hydrology, 198, 346-376.
- Craig, H., 1961, Isotopic variations in meteoric waters: Science, 133, 1702-1703.
- Fetter, C.W., 1988, Applied Hydrogeology: Columbus Ohio, Merrill, 3a Edición, 691 p.
- Freeze, A., Cherry, J.A., 1979, Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, EE.UU., Prentice Hall, 604 p.
- Gogu, R.C., Carabin, G., Hellet, V., 2001, GIS-based hydrogeological databases and groundwater modelling: Hydrogeology Journal, 9, 555-569.
- Hantush, M.S., 1956, Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers: American Geophysical Union, Transactions, 37, 702-714.
- Hantush, M.S., 1960, Modification of the theory of Leaky Aquifers: Journal of Geophysical Research, 65, 3713-3725.
- Hemker, C.J., 1999a, Transient well flow in vertically heterogeneous aquifers: Journal of Hydrology, 225, 1-18.
- Hemker, C.J., 1999b, Transient well flow in layered aquifer systems; the uniform well-face drawdown solution: Journal of Hydrology, 225, 19-44.
- Lemon, A.M., Jones, N.L., 2003, Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections: Computers and Geosciences, 29, 547-555.
- López-Hernández, A., 1996, Modelo geológico de un sistema hidrotermal no volcánico; San Bartolomé de los Baños, Gto., México: Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, 12(1), 19-32.
- Mayo, L.A., Koonts, W., 2000, Fracture flow and groundwater compartmentalization in the Rollins Sandstone; Lower Mesaverde Group, Colorado, USA: Hydrogeology Journal, 8, 430-446.
- Mazor, E., 1991, Applied chemical and isotopic groundwater Hydrology: Halsted Press, New York, EUA.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V.H., Tibaldi, A., Vezzoli, L., 1991, Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán: Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072, 22 p.
- Pérez-Venzor, J.A., Aranda-Gómez, J.J., McDowell, F.W., Solorio-Munguía, J.G., 1996, Geología del Volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(2), 174-183.
- Ruud, N.C., Kabala, Z.J., 1997, Response of a partially penetrating well in a heterogeneous aquifer; Integrated well-face flux vs. uniform well-face flux boundary conditions: Journal of Hydrology, 194, 76-94.
- Theis, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and rate and duration of discharge of a well using groundwater storage: American Geophysical Union, Transactions, 2, 519-524.
- Trejo-Moedano, A., Bains, M.A., 1991, Agrietamiento de suelos en la zona de Querétaro, en Memorias del simposio Agrietamiento de Suelos: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS), 67-74.
- 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.
- Valdez-Moreno, G., Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 1998, El volcán La Joya, estados de Querétaro y Guanajuato; un estratovolcán miocénico del Cinturón Volcánico Mexicano: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 15(2), 181-197.

Manuscrito recibido: Marzo 20, 2004

Manuscrito corregido recibido: Noviembre 16, 2004

Manuscrito aceptado: Noviembre 18, 2004