

CARTA HIDROGEOLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO DE LAS AVENIDAS, DE PACHUCA, HGO., MÉXICO*

Rafael Huizar Álvarez**

Resumen

El presente mapa contiene las características hidrogeológicas de la Cuenca Río de las Avenidas de Pachuca, Hidalgo, y se observa que la naturaleza geológica del área determina la existencia de tres unidades acuíferas que tienen conexiones hidráulicas entre sí y forman un sistema acuífero.

Todo este sistema acuífero constituye una zona de recarga, y sólo existe descarga en forma artificial y es superior a la recarga, esto lo muestra el balance hidrológico obtenido, y confirmado por el análisis piezométrico para un periodo de 20 años, el cual manifiesta que la explotación produce el descenso del nivel del agua en un promedio de un metro por año. Asimismo, la piezometría pone en evidencia un flujo regional con dirección N-S, a partir del Cerro Cubitos.

En términos generales el agua subterránea de esta cuenca es de buena calidad para cualquier uso, pero existen zonas como Téllez y Tizayuca, donde se detectan índices de contaminación de tipo orgánica e inorgánica.

Résumé

Cette carte comporte les caractéristiques hydrogéologiques du Bassin Río de las Avenidas de Pachuca, Hidalgo, où l'on observe que dans cette zone le contexte géologique détermine l'existence de trois unités aquifères qui ont des connexions hydrauliques et composent un système aquifère.

Ce système constitue une zone de recharge, où les sorties sont seulement artificielles et supérieures à la recharge, comme le montre le bilan hydraulique obtenu dans cet étude et comme le montre également l'analyse piézométrique pour une période de 20 ans, qui révèle que le niveau de l'eau baisse un mètre par ans, par suite de l'exploitation.

De même depuis le Cerro Cubitos, l'analyse piézométrique met en évidence un flux régional du nord vers le sud.

D'une façon générale l'eau souterraine de ce bassin est de qualité suffisante pour tous les besoins, mais dans les zones de Téllez y Tizayuca, on s'aperçoit qu'il a des indices de pollution de type organique et inorganique.

*Recibido: 29 de marzo de 1993.

** Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510 México, D.F.

Introducción

La cuenca del Río de las Avenidas, de Pachuca, Hidalgo tiene una superficie de 1 941 km²; el 25% de esta superficie corresponde a la planicie que se extiende desde la Sierra de Pachuca, al norte, hasta la Sierra de Guadalupe, al sur. Como resultado del crecimiento ilimitado de la Ciudad de México, el mayor porcentaje del área meridional de la planicie constituye parte de la zona metropolitana de esta ciudad; como es de suponerse, un crecimiento urbano de estas dimensiones requiere de un gran volumen de agua y, para satisfacerlo parcialmente, se ha hecho necesario importar agua de cuencas adyacentes a la Ciudad de México.

La cuenca del Río de las Avenidas aporta en promedio 1.3 m³/s de agua para completar las necesidades de la zona metropolitana e, incluso, al mismo Distrito Federal, y abastece también a la población local cuyas principales ciudades son Pachuca, Tizayuca, Ciudad Sahagún y Zumpango. Es notable la ausencia de estudios hidrogeológicos de esta cuenca por lo que no existe control de la extracción, se desconoce su potencial y, sobre todo, no hay vigilancia sobre la futura contaminación del sistema acuífero.

Pese a la gran cantidad de perforaciones existentes en esta cuenca no es posible contar con una base de información hidrogeológica completa y de calidad que permita obtener un buen balance del sistema acuífero; en el 100% de los casos no se conocen los parámetros hidráulicos del sistema acuífero, la densidad de las observaciones del nivel piezométrico es pequeña y sólo de algunos pozos se conoce su gasto.

Con este marco de referencia se eligió elaborar el mapa hidrogeológico de la cuenca del Río de las Avenidas, de Pachuca, en el entendido de que será una de las cinco hojas que integran el mapa hidrogeológico de la Gran Cuenca de México. Proyecto original que ya se inició con la Hoja Chalco, Huizar-A. (1993).

El objetivo de esta investigación es mostrar cartográficamente las características hidrogeológicas de esta zona, tales como tipos de acuíferos, su ubicación, calidad del agua subterránea, funcionamiento del sistema acuífero y grado de explotación. En conjunto, este tipo de información permite disponer de conocimientos de apoyo fundamental no sólo para el hidrogeólogo, sino para todo profesional interesado en la planeación y desarrollo potencial de los recursos hídricos de la región. Asimismo, se pretende que este tipo de carta

ayude a vigilar la explotación de los acuíferos y sirva de apoyo para la integración del recurso agua en el marco de la planeación global.

La realización del mapa comprendió, inicialmente, la elaboración de la base geológica a partir de la información previa del área, misma que se completó con recorridos de campo. En forma paralela se realizó un censo de los aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales se eligieron aleatoriamente algunos para realizar en ellos muestreos de agua, piezometría, y en muy pocos pozos se pudieron efectuar aforos y pruebas de bombeo. Las secciones lito-estratigráficas y el marco geológico que aquí se presentan están basados, en gran parte, en la información geológica y geoeléctrica de pozos proporcionada por la Gerencia de Aguas del Valle de México (GAVM), y fueron complementados por interpretación geológica del autor. Es importante señalar que la información litológica de los pozos a los que se tuvo acceso fueron descritas por los perforistas, por lo que no se pudo confiar al 100% en las descripciones petrográficas.

Toda esta información se cartografió a escala de 1:50 000 y posteriormente se redujo por métodos mecánicos, para su edición a escala 1:100 000.

Las características químicas, físicas y bacteriológicas del agua subterránea se determinaron a través del análisis de 57 muestras de agua de pozo.

1. Antecedentes

A la fecha existen sólo dos estudios hidrogeológicos del área que nos ocupa. El primero fue realizado por la Gerencia de Aguas del Valle de México (GAVM) en 1986, mientras que el segundo lo elaboró la empresa TACSA (1986), para la Compañía Minera Real del Monte, y se limita a la Sierra de Pachuca. En ambos trabajos se infieren permeabilidades para los tipos de rocas del área, así como la posible dirección del flujo subterráneo.

En 1975 la Comisión de Aguas del Valle de México (CAVM) realizó un estudio geofísico (geoeléctrico) a lo largo de la carretera Tizayuca-Pachuca, en un tramo comprendido entre los pueblos de Tecámac y Matilde, y otro del pueblo de Téllez a Pachuca; con las secciones geoeléctricas obtenidas se interpretó la litoestratigrafía hasta 300 m de profundidad.

Desde el punto de vista geológico, el área ha sido estudiada por Fries (1962) quien elaboró la Hoja Pachuca; Geyne (1963) levantó la geología de detalle de la Sierra de Pachuca;

Mosser (1975) elaboró la carta geológica de toda la Cuenca de México; DETENAL (1975), con base en estudios preexistentes, publica cartas litológicas de buena calidad; Ledezma (1987) cartografió la Hoja Calpulalpan, que comprende la parte oriental de la cuenca en estudio; Cserna y colaboradores (1987) presentan el mapa geológico-tectónico de toda la Cuenca de México, con énfasis en la Ciudad de México.

2. Marco geográfico

La subcuenca del Río de las Avenidas está delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: $19^{\circ} 45'$ y $20^{\circ} 10'$, de latitud norte, $98^{\circ} 30'$ y $99^{\circ} 07'$ de longitud oeste (figura 1).

Los rasgos naturales más sobresalientes son la planicie, que se extiende de norte a sur, su pendiente desciende suavemente desde Pachuca, a 2 400, hasta Zumpango, a 2 240 msnm. Esta planicie se interrumpe ligeramente por pequeñas elevaciones volcánicas al norte de Tizayuca y está bordeada por los siguientes relieves volcánicos de diferente edad: al sur la sierra de Teotihuacán, al oeste la sierra de Tolcayuca, al norte la Sierra de Pachuca, y al este, por un relieve volcánico de poca altura, sobresale la abrupta Sierra de los Pitos.

Geomorfológicamente, en esta cuenca se pueden distinguir los siguientes tipos de relieves:

a) Relieve volcánico - acumulativo. Constituye las sierras de Teotihuacán y la topografía de la parte oriental, exceptuando las sierras de los Pitos, Zempoala y de Epazoyucan.

La morfología de este relieve la conforman numerosos conos cineríticos que forman la sierra de Teotihuacán, y el relieve de la parte oriental la planicie, donde sobresale una pintoresca topografía de malpaís, al oeste de Singuilucan. En este relieve la erosión es incipiente, y eso permite apreciar numerosos conos volcánicos bien conservados.

b) Relieve volcánico - denudatorio. Se caracteriza por un modelado muy acentuado, sobresaliendo las sierras de Pachuca y los Pitos. En ellas los procesos erosivo-denudatorios se ven favorecidos por la intensa deformación que afecta al relieve, manifestándose por una abrupta topografía con barrancos muy angostos que exhiben escalones bien marcados en su fondo.

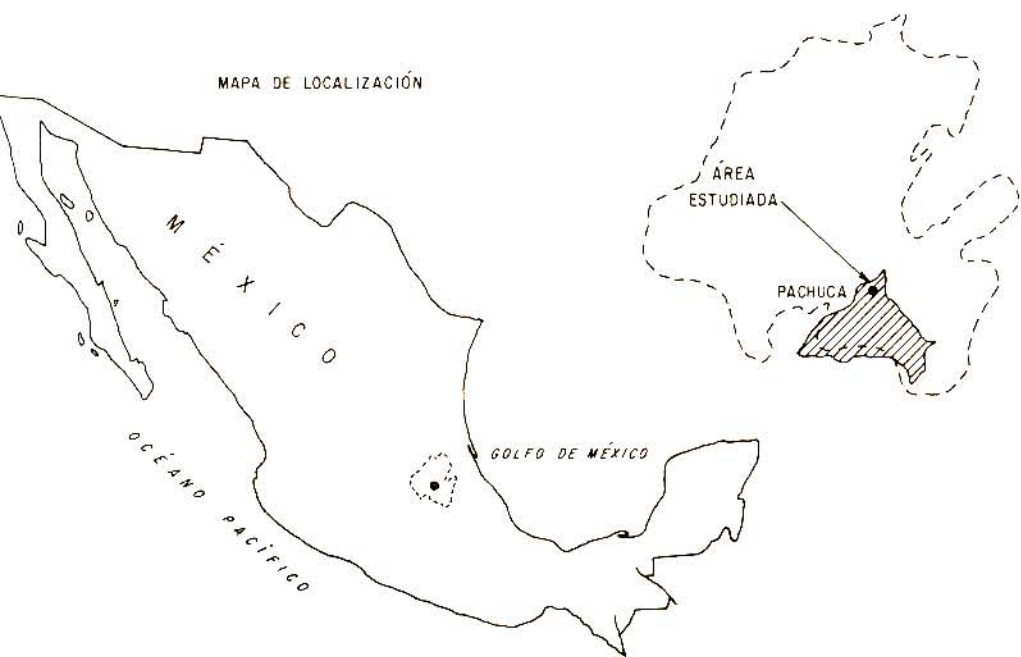


Figura 1. Localización del área estudiada.

En la sierra de Tolcayucan el grado de erosión es menor, formándose valles más amplios y un relieve más singular.

c) **Relieve erosivo.** Se manifiesta por sedimentos proluviales y aluviales que integran el piedemonte de las sierras más antiguas, donde forman abanicos aluviales, sobresaliendo el de la Sierra de los Pitos.

d) **Relieve acumulativo.** Está integrado por sedimentos fluviales y constituye la planicie y los amplios valles que confluyen a ésta.

El 25% de la superficie del área en estudio es cultivable y, no obstante que se cultiva una superficie importante, la agricultura ocupa el último lugar dentro de las actividades económicas de esta región. De la superficie agrícola el 0.04 se riega con agua residual y el .006% con agua de pozo. En el primer caso destacan los ejidos Reforma y Pachuquilla que aprovechan, sin previo tratamiento, el agua residual de la ciudad de Pachuca más el excedente de la Compañía Minera Pachuca Real del Monte.

Al NE de Zumpango se utiliza para riego tanto el agua residual que lleva el Río de las Avenidas como el agua de pozos.

En el valle de Ciudad Sahagún también se riega con agua residual, no tratada, procedente de Ciudad Sahagún, Tepeapulco e Irolo.

La industria y el comercio son las principales actividades locales. Las industrias locales son la automotriz, en Ciudad Sahagún; textil, química y lechera en Tizayuca; y cerámica, textil y minera en Pachuca.

Climatología e Hidrografía

El análisis del clima se realizó considerando la información meteorológica registrada en 24 estaciones de observación, para el periodo 1970-1988. Cabe mencionar que la información es incompleta, pues sólo 9 de las 24 estaciones registran datos de lluvia, temperatura y evaporación. El resto únicamente tiene los dos primeros y por un periodo de observación más corto.

En la zona en estudio las mayores precipitaciones pluviales son en el verano, con el 95%, y el 5 en el invierno (**figura 2**).

Los valores de la lluvia oscilan de los 1 500 mm, en la cima de la Sierra de Pachuca, a 350 mm en zonas bajas, como sucede en la Presa Girón y en Epazoyucan (**figura 3**).

Desde el punto de vista climático, la morfología influye en los climas que se presentan en esta área, ya que las elevaciones son verdaderas sombras meteorológicas, como por ejemplo, en la Sierra de Pachuca, donde los vientos húmedos chocan, producen precipitaciones y dejan la humedad al lado norte, y pasan al otro lado como vientos secos provocando sequías.

Aunque los rangos de temperatura son amplios, éstos caracterizan un clima templado. La variación media anual es entre 12 y 18°C (**figura 4**). El mes más frío es enero, con temperaturas entre -4 y 12°C, y el mes más cálido es siempre mayo, con temperatura entre 22 y 29°C.

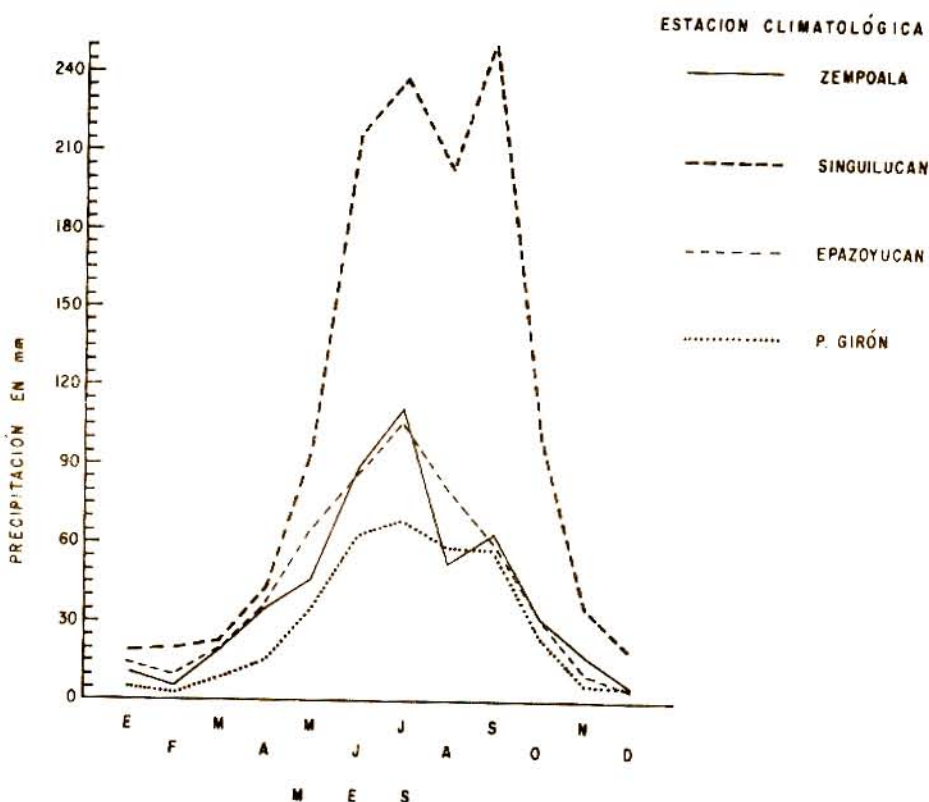


Figura 2. Lluvia media mensual en algunas estaciones climatológicas.

La oscilación de la temperatura es extrema en toda el área, con un valor mayor de 15°C. La evaporación registrada en tan solo nueve estaciones permite inferir que la evaporación potencial en toda la cuenca es, en promedio, de 1 600 mm.

El valor de la evapotranspiración real fue calculado para toda el área y se aprecia que varía entre el 90 y 45% de la precipitación media anual en las partes alta y plana, respectivamente.

Hidrología

La red hidrológica está integrada por arroyos de longitud variable, y su configuración manifiesta claramente las condiciones litológicas y estructurales del relieve. Así, se observa que existe drenaje de tipo dentrítico rectangular y paralelo; el primero diseca el relieve más joven y los dos restantes al relieve más antiguo y más tectonizado.

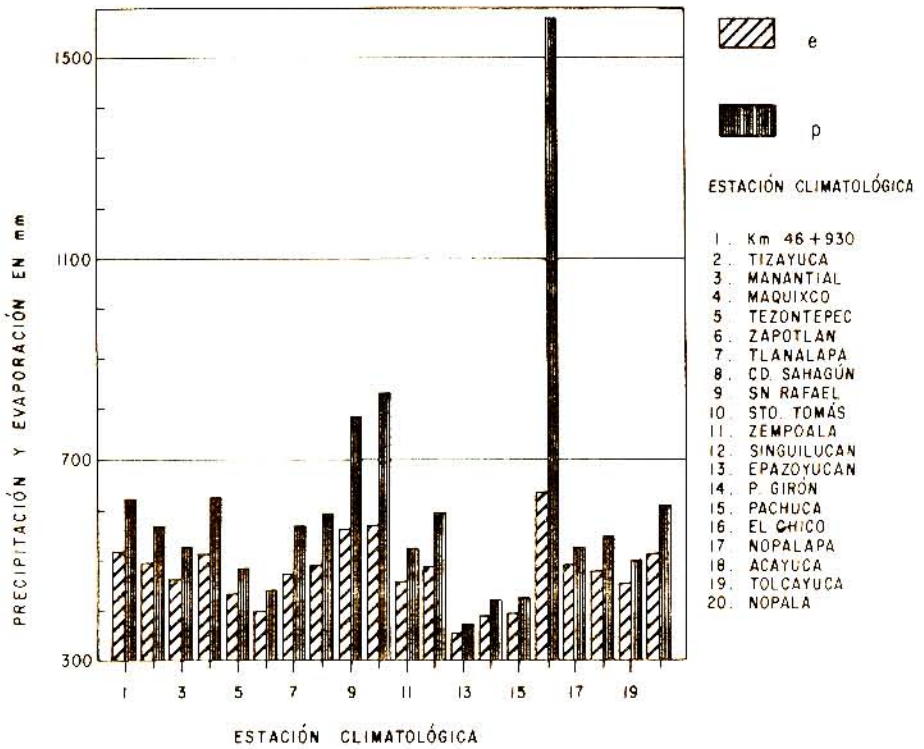


Figura 3. Precipitación y evaporación real medias anuales.

Los principales ríos de la cuenca son: el de las Avenidas, de Pachuca, que es el cauce principal del área; se origina en la sierra del mismo nombre y desemboca en forma artificial al Gran Canal; el Papalote, que se inicia en la planicie de Irolo y se une al anterior en la zona de Mogotes. Existen numerosos escurrimientos que al llegar a la planicie se infiltran.

El régimen hídrico de los arroyos está condicionado a las características hidrogeológicas del área. Así, los arroyos que drenan rocas poco permeables traducen directamente los episodios lluviosos y se presentan caudales torrenciales de gran irregularidad, con periodos de estiaje muy marcados; Los arroyos la Palma, Epazoyucan y Acayuca son ejemplos de esto.

El escurrimiento que drena terrenos más permeables tiene un caudal de base más constante que desaparece lentamente al entrar a la planicie y conforme disminuye el drenaje del agua de lluvia. Posteriormente, fluyen de nuevo al llegar las lluvias; los ríos Papalote y de las Avenidas tienen este comportamiento.

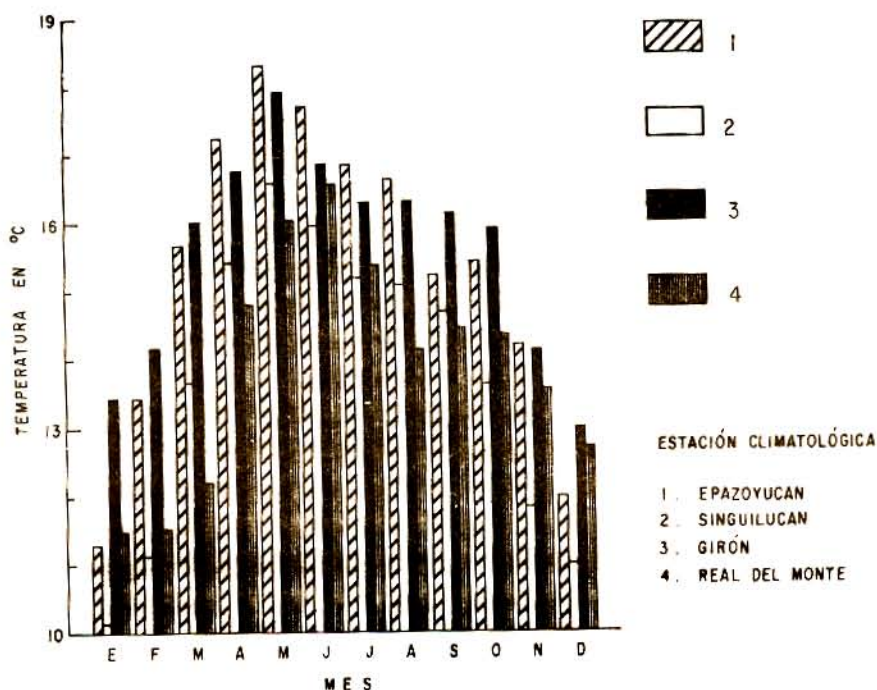


Figura 4. Temperatura media mensual.

El aporte medio del Río de las Avenidas, a la salida de la cuenca, es de cinco millones de m^3 anuales (periodo considerado: 1971-1979), registrándose el 80% del total en época húmeda, el resto corresponde a flujo de agua residual (figura 5).

El agua residual de la ciudad de Pachuca, más el agua excedente de las minas de Pachuca forman un volumen aproximado de $.700 m^3/s$. En la temporada seca este caudal es utilizado para riego, sin recibir previo tratamiento. El riego se realiza a través de canales naturales, también se vierte el agua en zonas bajas, formando pequeños lagos donde una parte se infiltra y otra se evapora. En la estación de lluvias el agua residual más la pluvial, mezcladas, fluyen río abajo; en su recorrido parte del agua se infiltra o se evapora en la planicie, parte de este caudal llega al Gran Canal, para salir hacia el Río Moctezuma.

Los manantiales que afloran en la cuenca son captados para uso doméstico y los volúmenes aproximados son de $189\ 216 m^3$ anuales. La cuenca de Pachuca recibe escurrimiento superficial a través de los canales artificiales construidos para drenar hacia ésta las cuencas de Apan y Tecocomulco, el volumen promedio anual que sale de esas cuencas es de ocho

millones de m³, del cual 12% es agua residual que, al igual que al sur de la ciudad de Pachuca, en época seca se utiliza para riego en el valle de Sahagún.

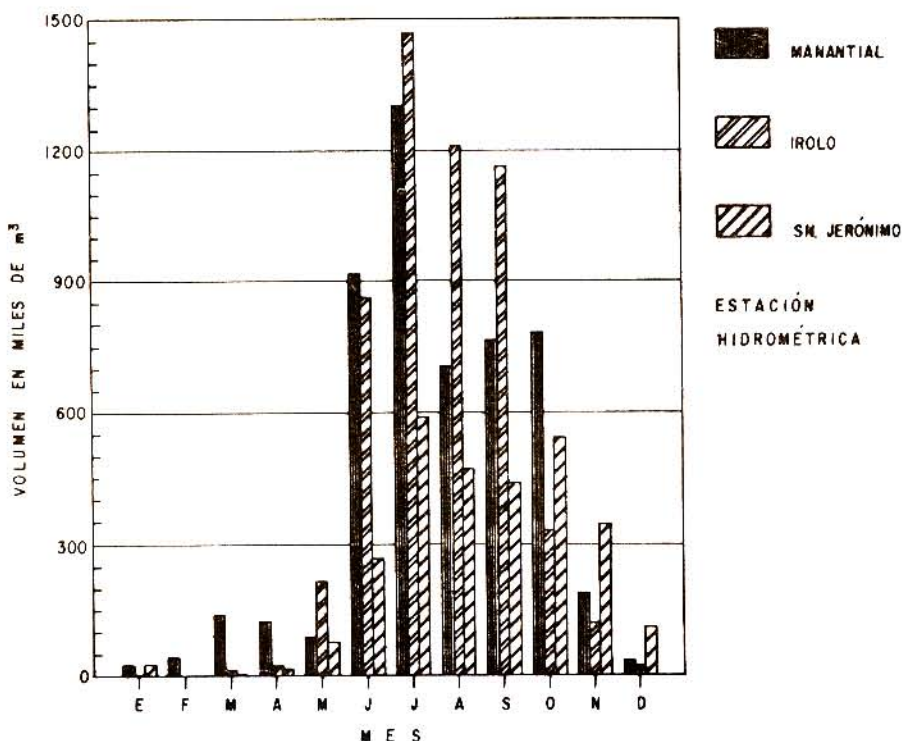


Figura 5. Gastos medios mensuales en estaciones hidrométricas.

3. Geología

La geología superficial (figura 6) se basó en los estudios de Fries (1962), Geyne (1963), Mosser (1975) y Cserna y colaboradores (1987). Las secciones geológicas se elaboraron con información geofísica y cortes geológicos de pozos perforados para agua por la GAVM, entre 90 y 400 m de profundidad.

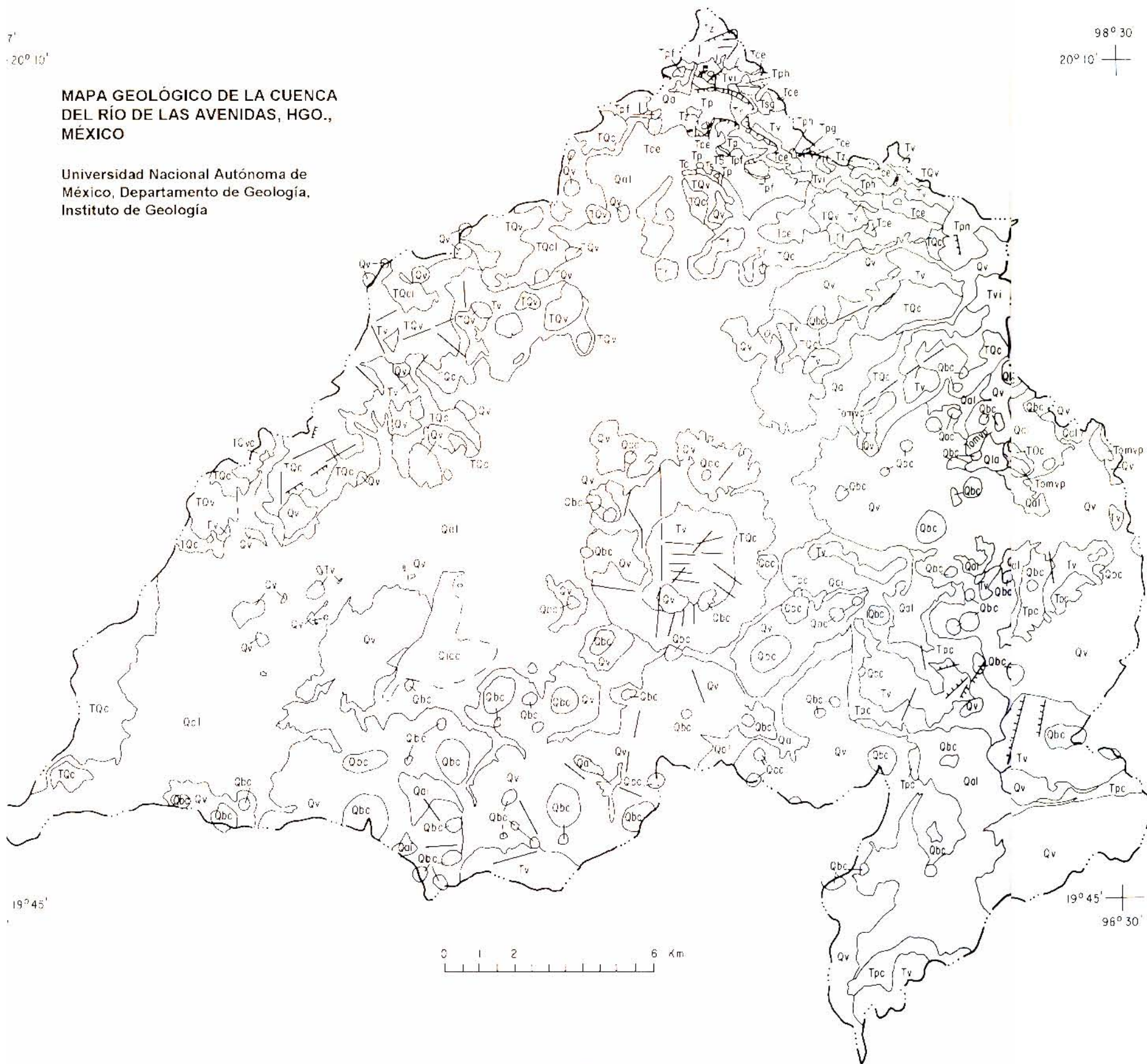
Respecto a la nomenclatura, se describen las rocas agrupadas en paquetes cronoestratigráficos, pues no es objetivo de este trabajo hacer estratigrafía de detalle.

Con base en los estudios antes citados se describe el marco estratigráfico del área incorporando pequeñas modificaciones a partir de observaciones de campo.

7'
20° 10'

MAPA GEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO DE LAS AVENIDAS, HGO., MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geología, Instituto de Geología



98° 30'
20° 10'

EXPLICACIÓN

ROCAS SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS

DEPÓSITOS CUATERNARIOS

- Qal Aluvión. Incluye lentes delgadas de ceniza volcánica.
- Ql Depósitos lacustres.
- Qv Lavas, brechas y cenizas volcánicas de composición basáltica o basáltica-andesítica.

DEPÓSITOS PLIO-CUATERNARIOS

- TQc Rocas volcánicas eólicas y piroclásticas formando antiguos abanicos aluviales, gruesos espesores de tobas asignados a la Formación Tarango.
- TQcl Depósitos piroclásticos, arena volcánica y tobas.
- TQv Rocas basálticas, andesitas y dacitas, en forma de domos volcánicos y derrames de lava, con material piroclástico asociado.
- TPc Formación Calpulalpan. Sedimentos piroclásticos y depósitos de piedemonte de composición andesítica.
- TPn Formación Navajas. lavas y tobas riolíticas.

DEPÓSITOS TERCIARIOS

- Tv Rocas volcánicas no diferenciadas de composición riolítica.
- Tz Formación Zumate. Lavas, brechas y tobas de composición dacítica y andesítica.
- Tl Formación Tezcuantla. Lavas riolíticas y riodacíticas.
- Tvi Formación Vizcaina. Derrames de lava y brecha andesítica y dacítica.
- Tsg Formación Santa Gertrudis. Lavas y brechas de composición andesítica.
- Tr Formación Real del Monte. Brechas y lavas masivas de naturaleza andesítica y dacítica.
- Tp Formación Pachuca. Lavas y brechas andesíticas y dacíticas.
- Tc Formación Corteza. Derrames de lava de composición andesítica y riolítica.
- Ts Formación Santiago. Lavas y brechas riolíticas.
- Tomvp Ancasita el Peño. Lavas andesíticas y derrames de riolita en la parte superior.

ROCAS INTRUSIVAS

- Tpg Pórfido cuarífero de grano grueso en forma de diques.
- Tpf Pórfido cuarífero de grano fino en forma de diques.
- Tph Pórfido de dacita en forma de dique.

Contacto geológico en línea interrumpida donde es inferido
 Fractura Falla Parteaguas superficial

Fuente de información

La geología se basó en los trabajos de:
 Cserna, *et al.* (1987); Fries (1962); Goyné (1963); INEGI (1975); Ledezma (1987); Mosser (1975).
 La recopilación, interpretación y redacción de los datos fue elaborada por Rafael Huizar y Efraín Toxtli. La fotogeología y el trabajo de campo permitieron hacer pequeñas modificaciones.

Figura 6.

Depósitos terciarios

Se incluye aquí a las rocas volcánicas y depósitos piroclásticos de composición variada, cuya edad se considera oligoceno-mioceno.

Rocas volcánicas no diferenciadas. Tv. Son derrames de traquiandesita y riolita de color gris claro, constituyen la Sierra de los Pitos y pequeños afloramientos cerca de Zacacalco. Estas rocas subyacen a las cretácicas y a las volcánicas oligocénicas, se extienden en la planicie y se interdigitan con los depósitos fluviales. Mosser (1975) considera a estas rocas como del Terciario inferior.

Grupo Pachuca. Rocas volcánicas de diversas edades y de composición variables, sobreyacen discordantemente a las rocas cretácicas en la Sierra de Pachuca. Segerstrom (1962), Geyne (*Ibidem*). La sucesión volcánica de este grupo comprende una secuencia de ocho formaciones de roca volcánica que se constituyen por estratos interdigitados compuestos por derrames de lava, brecha volcánica, arena tobácea y lahares, con espesor variable en cada formación. Los materiales clásticos existentes fueron depositados por transporte fluvial, pues el límite entre cada formación por lo general corresponde a un periodo de erosión. Las formaciones del Grupo Pachuca son las siguientes.

Formación Santiago. Ts. Unidad basal del grupo, contiene principalmente material riolítico, andesítico y dacítico, intercalado en la base; en la cima de la Formación existen conglomerados que la limitan de la **Formación Corteza. Te.**, la cual consta de derrames de andesita de color negro. El espesor conocido es de 300 m. Sobreyaciendo, está la **Formación Pachuca. Tp.**, constituida en la base por piroclastos, derrames de composición andesítica y dacítica; su espesor es de 600 m, enseguida está la **Formación Real del Monte. Tr.** de composición parecida, aquí predominan las brechas en vez de lava, su espesor es de 200 m. Después está la **Formación Santa Gertrudis. Tsg.** con predominancia de lavas andesíticas de textura porfídica, el espesor es de 350 m.

Formación Vizcaína. Tvi. Contiene en la base conglomerado en matriz tobácea, brecha volcánica de composición andesítica y dacítica, su espesor es de 600 m. Fue afectada por erosión antes del depósito de la **Formación Cerezo. Tce.**, sobreyacente, constituida por materiales epiclásticos de composición riolítica y riodacítica, su espesor es de 200 m. Esta unidad también sufrió erosión antes de la extravasación de la **Formación Tezuantla. Tt.** formada por lavas riolíticas y riodacíticas en espesor de 300 m.

Formación Zumate. Tz. Cubre gran parte de la sierra, contiene material clástico en la base, seguido de lavas andesíticas; en la cima tiene depósitos de lahar andesítico, su espesor es 360 m.

En la parte oriental de la cuenca, Ledezma (1987) cartografió, cerca de Singuilucan, Hgo. rocas de composición andesítica color gris claro que intemperiza en color verde, y que en parte está cubierta por derrames de riolita. (**Andesita el Peñón, Tomyp**). Por relaciones estratigráficas la correlaciona con el Grupo Pachuca y le asigna una edad oligoceno-mioceno.

Depósitos Plio-Cuaternarios

Rocas cuya edad probable es plio-pleistoceno (Cserna *et al.*, 1987); se agrupan rocas volcánicas y epiclásticas de composición andesítica a basáltica y son las siguientes.

Riolita Navajas. Tpn. Lavas, brechas y tobas riolíticas intercaladas entre sí. Forma el Cerro las Navajas cuya edad probable es pleistoceno tardío (Geyne, 1963).

Rocas volcánicas. TQv. Constituidas por derrames máficos de basalto a dacita que sobreyacen, en discordancia erosional, a las rocas volcánicas anteriores. Estas rocas se distribuyen principalmente en el lado oeste de la zona y constituyen la Sierra de Tolcayuca. Las lavas son más predominantes que los productos volcanoclásticos. Segerstrom (1962) llamó a estas rocas **Formación San Cristóbal** y las asignó al plioceno tardío; hacia el interior de la planicie estas rocas se interdigitan con la **Formación Tarango**.

Rocas epiclásticas. Son sedimentos fluviales depositados en el piedemonte donde forman abanicos aluviales, que se extienden hacia la planicie, y depósitos piroclásticos de caída libre. En esta cuenca se han distinguido tres áreas con variaciones significativas en los depósitos:

TQc. Depósitos de arena fina, limos y tobas arcillosas muy compactos con capas de caliche. En la Sierra de los Pitos estos materiales presentan, además, arena gruesa y limos. Estos sedimentos cubren las rocas volcánicas anteriores.

Formación Calpulalpan. Tpc. Ledezma (1981) llamó así a los depósitos fluviales semejantes a los que existen en la parte oriente de la cuenca en estudio y los correlaciona en edad con la **Formación Tarango**, del plioceno tardío-pleistoceno (Segerstrom, 1962).

TQc1. Son depósitos donde predominan arenas volcánicas de color negro con espesor y grado de compactación variable, están cubiertas por tobas arcillosas menos compactadas.

Depósitos Cuaternarios

Rocas Volcánicas. Qv. Son las rocas con mayor extensión en el área. Se reconocen derrames de lava y conos cineríticos de composición que varía de basalto de olivino a dacita. Se aprecian lavas muy fluidas, en bloque y con estructura masiva. Estas rocas forman el relieve que se extiende al N y NE de Tizayuca, se prolonga hasta Ciudad Sahagún y Singuilucan; hacia el NE de Zempoala existe una topografía de malpaís. Estas rocas se interdigitan con el aluvión.

Aluvión. Qal. Constituyen la planicie, son materiales granulares que varían de conglomerado a arcilla; hacia la falda de las montañas se observan con gran frecuencia capas de caliche y el aluvión está más cementado. El espesor del aluvión es variable, llegándose a encontrar hasta 200 m en los tiros de las minas de Pachuca; en los pozos de agua los espesores varían hasta 100.

Lacustres. Ql. Por condiciones naturales existen en la planicie zonas bajas que presentan inundaciones, donde es común encontrar depósitos lacustres constituidos por arcilla y limos cuyos espesores oscilan de 10 a 100 m.

Rocas intrusivas

Estas rocas afloran en la Sierra de Pachuca, son numerosos diques de cuerpos irregulares que en superficie presentan longitudes y anchura variable de 4 km a 100 m; en el subsuelo esas dimensiones son mayores. Los diques tienen forma de embudo que se ensancha hacia arriba, están constituidos por rocas porfídicas de dacita hornbléndica (TPh) y pórfidos cuarcíferos (TPf, TPg). Los primeros se disponen en dirección W-W y los segundos en dirección NE-SW. Estos diques intrusionan la Sierra de Pachuca hasta la formación Cerezo.

4. Geología estructural

Las principales estructuras de esta cuenca son los conjuntos de volcanes que se disponen en dirección NE-SW y E-W. Estas estructuras corresponden con fracturas y fallas de edad terciaria y cuaternaria por las cuales se desarrolló el volcanismo que formó estos relieves.

La topografía presenta un escalonamiento hacia la planicie, que parece corresponder con fallas verticales cuya orientación es NE-SW y son afectadas por un sistema de fracturas de dirección N-S y NW-SE. Los escalones en la topografía permiten suponer (Marín, 1986) que la planicie constituye una fosa tectónica delimitada por este relieve. La Sierra de los Pitos puede ejemplificar esto, pues su vertiente poniente se trunca en línea recta de dirección N-S; la sierra de Tolcayuca presenta también algunos escalones en dirección NE-SW, hacia la planicie.

En el interior de la planicie los cortes geológicos de los pozos 1b, 2b, 12, 22, 23 y 32 del Ramal Tizayuca-Pachuca infieren la presencia de fallas verticales de dirección NE-SW que afectan a las rocas volcánicas atravesadas lo mismo se observa en la zona de Tlétz (figura 7).

Cserna *et al.* (1987) al analizar el campo volcánico de Tizayuca afirma la presencia de fracturas extensionales de cizalleo con orientación NE-SW, afectando a esta sierra.

Marín (1990), por otra parte, presenta un enjambre de fallas distensionales también de orientación NE-SW, comunicadas con otras de dirección NW-SE. Dicho autor asocia la generación de estas fallas a la existencia de dos ejes distensivos que afectan a la Cuenca de México, Apaxco-Izúcar y Actopan-Apizaco, respectivamente.

5. Hidrogeología

Teniendo como base el cuadro estratigráfico y el marco estructural antes descritos, se pueden separar los tres tipos de acuíferos siguientes: **fisurado, intergranular y estratificado**. Todas estas unidades tienen conexiones directas entre sí, por lo que constituyen un sistema acuífero.

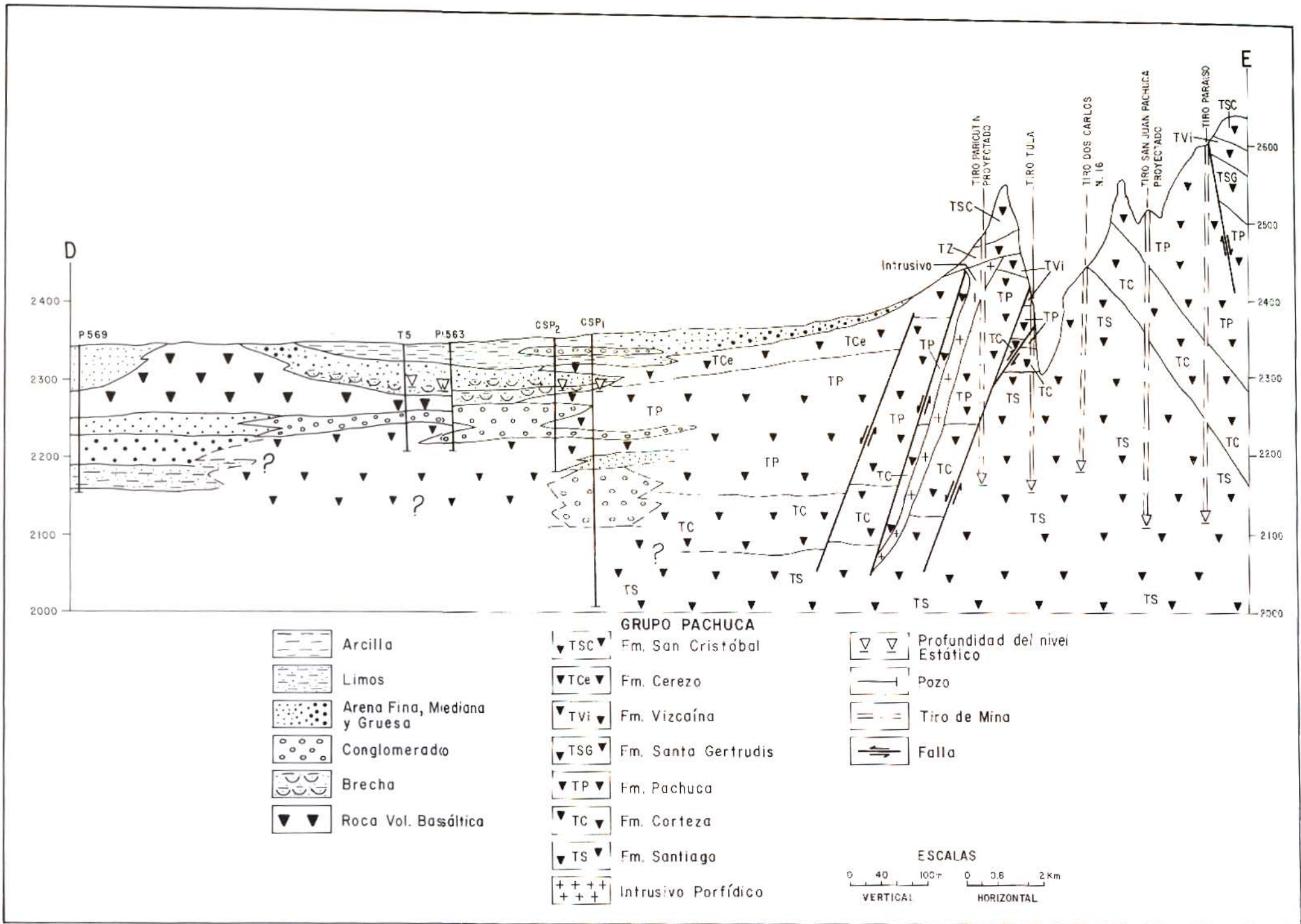


Figura 7. Sección hidrogeológica a través de los pozos Téllez y tiros de las minas de Pachuca.

Acuífero fisurado

En las rocas volcánicas terciarias y cuaternarias que forma el relieve de la zona en cuestión. Se distribuye alrededor del acuífero intergranular, cubre una superficie de 1 441 km², y está constituido por una variada litología que permite subdividirlo en las siguientes tres subunidades.

a) **De productividad local limitada.** Constituida por las sierras de Tolcayuca, Teotihuacán y el relieve situado al sur de Singuilucan.

En la primera sierra, en el sector comprendido entre los pueblos San Francisco Zacacalco y Acayuca, los derrames de rocas andesíticas forman un grupo volcánico de estructura masiva afectadas por diaclasas e interdigitado en el piedemonte con material piroclástico; no presenta afloramiento de agua. Mientras que en el sector de Acayuca a la ciudad de Pachuca las tobas que se intercalan con las andesitas y basaltos forman horizontes semipermeables que permiten la existencia de pequeños manantiales y favorecen que los pozos naturales de los basaltos proporcionen pequeñas cantidades de agua todo el año, como se observa en la proximidad de los ranchos La Biznaga y al SE de El Tepozán a 2 420 y 2 520 m de altura, respectivamente. La diferencia promedio de este nivel estático respecto a aquél de la planicie es de 90 y 180 m, y permite inferir la existencia de un pequeño acuífero suspendido.

En la sierra de Teotihuacán, conformada por numerosos conos volcánicos sobrepuestos uno a otro, cubiertos por una capa de piroclastos de espesor superior a 3 m, se presentan manantiales insignificantes, durante la época húmeda, en su parte alta.

Límites. En la sierra de Tolcayuca las lavas y el material epiclástico del piedemonte, por interdigitación, tienen comunicación con los sedimentos aluviales de la planicie. En el sector norte, la presencia de manantiales a 180 m por encima del nivel de la planicie, infiere que la comunicación entre los basaltos y los depósitos de la planicie se dificulta por la existencia de material semipermeable.

En la sierra de Teotihuacán, el material volcánico se interdigita y tiene conexión directa con los sedimentos aluviales. En la zona de Sahagún las rocas terciarias infrayacentes forman su límite inferior semipermeable y se interdigita con los sedimentos de los valles.

Movimiento de agua subterránea. En la sierra de Teotihuacán existen manantiales temporales, descendentes, a 2 500 msnm; tienen gastos pequeños 0.01 l s^{-1} y drenan hasta la mitad de la época seca, por abajo de esa cota; la zona de saturación está más profunda, por esto el agua se infiltra a profundidad hasta llegar 60 m más abajo de la altitud de la planicie. Lo anterior indica que los ríos son de tipo influente, es decir, el escurrimiento está muy por encima del nivel piezométrico.

Las partes media y baja de esta sierra presentan degradación del sustrato vegetal, propiciando el aumento del escurrimiento, la reducción de la infiltración y, en igual forma, el aumento de la evaporación.

Donde la roca basáltica sobreyace rocas semipermeables el agua aflora y forma manantiales, como sucede en la base del volcán el Tecajete, donde existe una surgencia a 2 480 m de altura, en el derrame de basalto, con un caudal de 3.5 ls^{-1} . En Xoloxtitla, al este de Pachuquilla, existe un manantial descendente en el contacto basalto riolita, con gasto promedio de 1.5 ls^{-1} . Al oeste del pueblo de Acayuca, el agua llena pequeñas piletas naturales cuyos gastos son muy pequeños, de unos $0.300 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$.

Parámetros hidráulicos. Al momento de la presente investigación no existen pozos que puedan aportar estos datos, por ello solo se considera el gasto medio de los manantiales que aquí existen y que representan el aporte de pequeñas áreas de esta gran unidad, y son los siguientes: manantial Tecajete 3.5 ls^{-1} , Xoloxtitla 1.5 ls^{-1} , La Gloria 0.002 ls^{-1} . Con base en esto y por las características litológicas y estructurales de esta unidad, se infieren valores de permeabilidad media y alta.

b) Área con el nivel de agua a profundidad mayor de 200 m. Comprende toda la Sierra de Pachuca y, como se explicó anteriormente, está constituida por una serie de derrames de lava cuya composición va desde basalto hasta riolita, intercalados con sedimentos epiclásticos y piroclásticos del Grupo Pachuca, intrusionados por varios diques de composición intermedia.

También se incluye en esta unidad al relieve volcánico cuaternario de la sierra de Singuilucan, descrito antes.

Límites. Los diferentes estratos de tobas forman los límites inferiores de los diferentes acuíferos que existen en las rocas del Grupo Pachuca; otras veces son las rocas dacíticas o riolíticas. Como ejemplo de lo anterior se tienen los manantiales en la base de la Formación Zumate, cerca del pueblo del Cerezo, condicionados por las riolíticas subyacentes de la Formación Cerezo. Los diques dispuestos en dirección NW-SE fungen también como límites impermeables en él, internos para el flujo del agua. No obstante, existe comunicación hidráulica a través de las numerosas fracturas que afectan la sierra.

Hacia el lado este, las rocas del Grupo Pachuca se acuñan entre sí, pero tienen comunicación hidráulica con las rocas de la Formación Navajas, que forman el límite oriental. Hacia el oeste, el Grupo Pachuca se interdigita con las rocas de la sierra Tolcayuca. Hacia el norte tiene comunicación con las rocas cretácicas; finalmente, hacia el sur, las rocas del Grupo Pachuca tienen comunicación con los depósitos aluviales.

En la sierra de Singuilucan las rocas volcánicas, cuyo espesor se desconoce, tiene localmente como límite inferior a las rocas terciarias.

Movimiento del agua subterránea. Por la variedad litológica y la intensa fractura, la Sierra de Pachuca posee diferentes grados de permeabilidad, de muy alta a muy baja, estimados en algunos sitios con base en el gasto de las surgencias de aguas, en otros fue asignado cualitativamente.

El agua circula principalmente por las fracturas hasta llegar a niveles impermeables. Debido a lo poco permeable de la litología, el agua se concentra a lo largo de las fracturas que en otros tiempos alimentaron manantiales a diferentes altitudes, y que fueron drenados por las obras mineras. En efecto, Blázquez (1952) menciona que, para 1853, en la mina de Rosario la elevación del nivel freático era 2 720, y de 2 250 en la mina San Juan Pachuca. Para 1860, en las mismas minas este nivel estaba a 2 650 y a 2 100, respectivamente. Conforme el nivel de las minas descendía era necesario drenar para evitar inundaciones.

Existen comunicaciones informales que indican que, al atravesar las fracturas con las obras mineras, el agua almacenada en las fracturas se descargaba violentamente causando problemas.

En la actualidad la circulación en la parte más alta de la sierra no ha variado, a 2 920 m de altura la cima de la Formación Cerezo forma un límite semipermeable y origina manantiales

descendientes en la base de la Formación Zumate; estos manantiales poseen caudal todo el año, favorecido por la humedad permanente en la parte alta de la sierra. Parte del escurrimiento de superficie se infiltra principalmente a través de fracturas y vetas, circula por los laboríos y desciende a profundidad.

La zona saturada de la sierra se sitúa a 2 100 m de altura (nivel 370 de profundidad) en San Juan Pachuca, donde existen surgencias descendentes; en la mina Dos Carlos el acuífero está a 2 170 m de altura (nivel 16); en el tiro Paraíso el nivel dinámico del acuífero está a 2 070 m de altura (nivel 530 de profundidad) (**figura 7**). Toda esta agua desciende por fracturas, principalmente a través de vetas donde se aprecia que fluye el agua, y en otras ocasiones la circulación se hace por las paredes de los intrusivos.

En las minas El Alamo y San Juan Pachuca existen surgencias termales ascendentes; en el primer caso se encuentra el tiro Parícutin donde el nivel dinámico está a 2 162 m de altura (nivel 345 de profundidad), la mineralización del agua es 1 935 ppm de sólidos disueltos, y tiene 60°C de temperatura. El segundo caso es la zona de Tulipán, con el nivel dinámico a 2 100 m de altura (nivel 370), la mineralización es de 420 ppm sólidos disueltos, y la temperatura de 40°C. La diferencia en temperatura y mineralización de estos dos lugares explica un origen distinto. La de la zona de Tulipán es un agua meteórica que desciende por las fracturas, pasa cerca de rocas volcánicas aún calientes, que cambian la temperatura del agua sin cambiar su mineralización, para luego salir en el interior de la mina. Lo contrario se aprecia en Parícutin, donde la mineralización y la temperatura evidencian un origen volcánico del agua.

En la zona de Singuilucan, Zontecomate y Santo Tomás, el agua se distribuye en los estratos, y conforme desciende topográficamente circula por las coladas de lava y llega a formar manantiales, y otra parte se infiltra en profundidad. Ahí mismo, la presencia de valles cerrados, donde no se observan escurrimientos bien definidos, son drenados por resumideros.

Parámetros hidráulicos. De esta unidad solo se pudo conocer el gasto de las surgencias superficiales y en el interior de las minas, con base en ello se infirió un valor cualitativo de K para las rocas. En esta forma los gastos en las surgencias exteriores: Las Ventanas y El Cerezo son de 1.5 y 2 Ls⁻¹. Los gastos en las minas son 2.5, 36.0, 60.0 y 70 Ls⁻¹, en Tulipán, Dos Carlos, Paraíso y Parícutin, respectivamente.

Estos caudales permiten inferir una permeabilidad de tipo medio a las rocas que producen los dos primeros gastos y alta para el resto de los caudales.

c) Unidad sin recurso de agua subterránea o muy pequeño para ser aprovechado.

Comprende las rocas riolíticas y dacíticas en estructura masiva, afectadas por fracturas que constituyen varios cerros situados en la parte oriental de la cuenca. La poca cubierta vegetal y la baja permeabilidad de estos relieves favorecen más el escurrimiento superficial, por lo que la infiltración es prácticamente nula.

Límites. Estas rocas están rodeadas y cubiertas por rocas de mejor permeabilidad en la proximidad de Singuilucan (aluvión y basaltos), en otras ocasiones por sedimentos semipermeables, como se ve en la Sierra de los Pitos. Las rocas de esta unidad forman el límite semipermeable de los basaltos y aluvión, y propician que se presenten afloramientos de agua en el límite de ambas.

Intergranular

Incluye los sedimentos de la planicie, los amplios valles y el piedemonte. Posee el 25% de la superficie de toda la cuenca. Considerando el parámetro de productividad, este acuífero se puede subdividir en cuatro subunidades.

a) Extenso de alta productividad. Comprende el 95% de la parte plana, se extiende desde Pachuca hasta Zumpango y los valles de Sahagún y Epazoyucan-Zempoala; la composición litológica de este acuífero (deducido por el perfil geológico de pozos, registros eléctricos de pozos, estudios geoelectrónicos y trabajo de campo) es una alternancia de sedimentos aluviales y rocas volcánicas dispuestas irregularmente, los primeros predominan hacia el centro de la planicie y la granulometría de los clásticos varía desde arcilla a conglomerados; las lavas son de composición andesítica y basáltica.

La sección hidrogeológica incluida en el mapa muestra para el lado poniente de la cuenca, de norte a sur y de arriba hacia abajo, un horizonte aluvial con un espesor variable seguido de rocas volcánicas, después otro horizonte de aluvión con un espesor superior a 100 m, que incluye conglomerados; hacia el norte este aluvión disminuye su espesor y se interdigita con derrames de lava. Los mayores espesores del aluvión se presentan hacia el centro de la planicie.

En el área de Téllez existen depósitos aluviales con granulometría desde arcilla a conglomerado, derrames de lava en espesor que varía de 20 a más de 400 m; en la base es probable que se repitan los depósitos clásticos, éstos se interdigitan con las rocas del Grupo Pachuca.

Los datos analizados manifiestan la existencia de fallas verticales que afectan a las rocas volcánicas e influyen en los sedimentos clásticos.

Por su evolución geológica, la sedimentación de esta planicie es compleja, pudiéndose presentar pequeños lentes; los materiales más gruesos lo mismo están en la periferia que en el centro de la planicie y existen innumerables interdigitaciones que se han simplificado en las secciones.

Las secciones hidrogeológicas muestran que existen dos tipos de acuíferos: el intergranular, que tiene su mayor espesor hacia el sur, y el fisurado, con mayor espesor hacia el norte, pues la sección está muy próxima a la Sierra de Tolcayuca; los pozos 22 al 28 del ramal Tizayuca-Pachuca cortan prácticamente 400 m de roca volcánica. Ambos acuíferos se alternan uno y otro, pero en comunicación hidráulica directa.

Límites. Este acuífero tiene relaciones hidráulicas con todas las rocas de la periferia, esta comunicación es por interdigitación. Hacia la parte oeste, los depósitos epiclásticos del piedemonte forman un límite semipermeable para el aluvión; en el SW los sedimentos tobáceos también forman un límite semipermeable. En el resto de la planicie las rocas volcánicas forman un límite lateral de alimentación continua o intermitente muy importante.

La sección 5.1 muestra que las rocas intrusivas de las minas El Alamo y Parícutin forman una barrera impermeable para el agua, y también permite explicar por qué en el valle de Azoyatla el nivel del agua está 80 m más profundo que en la zona de Téllez al sur.

Parámetros hidráulicos. En esta unidad existen aproximadamente 180 pozos para agua, de profundidad variable, de los cuales difícilmente al 0.05% se le pudo obtener los parámetros hidráulicos. Esto se explica ya que se desconoce la necesidad de disponer de datos tan valiosos en la futura operación del pozo y en la vigilancia de la explotación del acuífero.

Para esta investigación solo se dispuso de doce observaciones de campo, esto se debió a que los pozos no disponen de medios para vigilar el nivel de agua, pues el ademe de muchos

pozos no está completamente recto, por lo cual es casi imposible sondear; otro problema fue la poca disposición por parte de los propietarios para llevar a cabo dichas observaciones. Las pruebas realizadas fueron en pozos del ramal Tizayuca-Pachuca y el ramal Tizayuca-Zumpango administrados por la GAVM, pues de algunos de estos pozos se tiene el corte geológico más o menos confiable y fue posible hacer lecturas del nivel del agua.

En esta forma, los rangos de transmisibilidad obtenidos son los siguientes.

En el área de Zumpango-Tizayuca, los valores oscilan de $9.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $1.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Hacia el norte de Tizayuca son de 2.6 a $5.4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($500 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$ a $1\ 209 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$) los gastos específicos varían de 14 a 74 L s m^{-1} .

El coeficiente de almacenamiento varía de 12 a 30% en toda la planicie.

Las permeabilidades en la planicie son de $1.4 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$ a $406 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$.

Piezometría. La evolución de la profundidad al nivel del agua se basó en el análisis del registro trimestral de este nivel en pozos y piezómetros, para un periodo de 20 años (1970-1990). En el mapa hidrogeológico se muestra la variación espacial de este nivel para el año 1989, la mayor elevación está hacia el NE del pueblo de Téllez a $2\ 280 \text{ m}$ de altura. La configuración muestra que el flujo subterráneo es en dirección sur. Existen dos zonas de notable abatimiento, la primera en el ramal Tizayuca-Pachuca, frente al pueblo de Acayuca, la segunda en la zona Zumpango-Tizayuca.

Como se aprecia, los valores varían de $2\ 280$ en el norte, a $2\ 206 \text{ m}$ en la zona sur, delimitándose un sensible parteaguas al norte de Tizayuca pues, el nivel $2\ 220 \text{ m}$ parece comunicar, a través del pequeño relieve, las planicies de Tizayuca-Zumpango y la de Ixtlahuaca. La misma dinámica se aprecia a lo largo del ramal Tizayuca-Pachuca.

Las **figuras 8 y 9** muestran la evolución de la piezometría de esta unidad, para 20 años de observación, tanto en piezómetros como en pozos. El nivel del agua tiene oscilaciones estacionales, es decir, se presenta una evolución positiva de julio a octubre y negativa de noviembre a mayo. En general el nivel tiene un descenso promedio de 1 a 1.5 m en el área Tizayuca-Zumpango y de 1.5 a 2 m en el ramal Tizayuca-Pachuca.

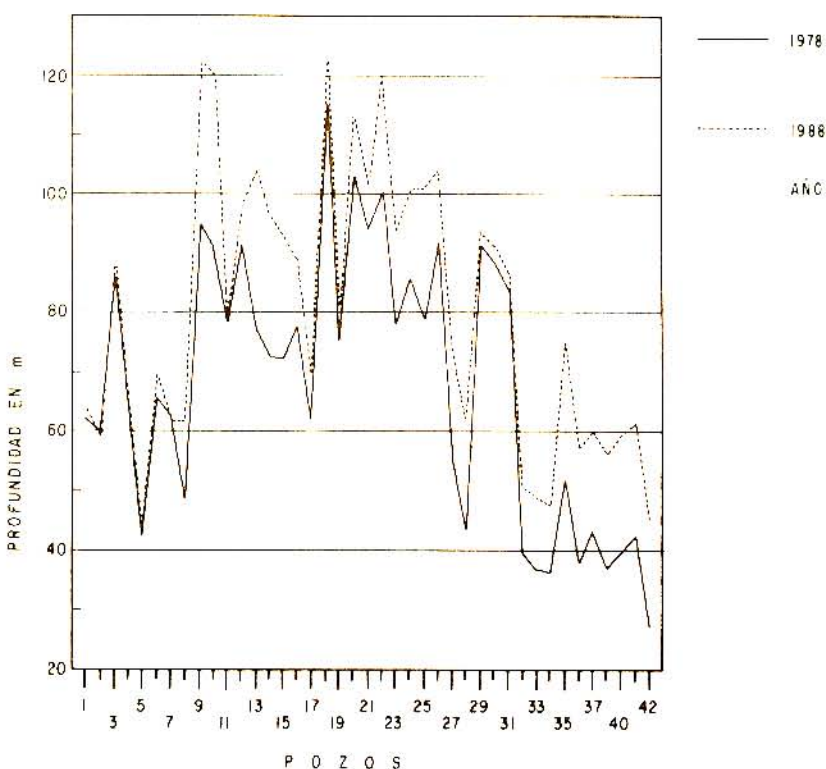


Figura 8. Evolución del abatimiento del nivel del agua en pozos de explotación.

Movimiento de agua subterránea. Considerando el relieve que constituye la cuenca en estudio y las características de sus límites, se entiende que el agua subterránea fluye desde las elevaciones hacia la planicie. Dentro de la planicie el flujo es de NE a SW, que es la orientación de la planicie; en las zonas con abatimiento importante el flujo es concéntrico.

En la zona de las minas El Alamo y Parícutin se presenta un flujo concéntrico a las minas y es independiente de aquel del área de Téllez.

b) De productividad media semiconfinado. Situado al norte de la ciudad de Zumpango ocupa el 0.07% de la planicie, está constituido por sedimentos aluviales cubiertos por una gruesa capa de tobas arcillosas muy compactas, que contiene varios horizontes de caliche. Los depósitos tobáceos tienen un espesor aproximado de 30 m y presentan bastante fisuramiento que, por lo general, está relleno de carbonatos.

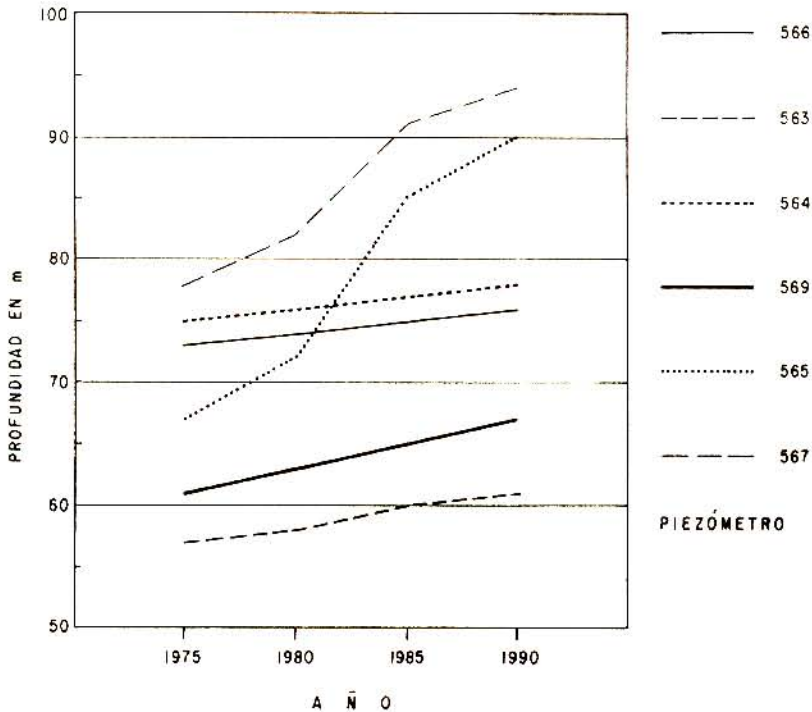


Figura 9. Evolución del nivel estático en pozos piezométricos.

Límites. Las tobas que cubren al aluvión forman un límite superior semipermeable que hacia los lados este y oeste se interdigitan con el aluvión; lo mismo hacia el norte con las rocas volcánicas de la sierra de Tolcayuca y hacia el sur con los depósitos lacustres de Zumpango.

Piezometría. La profundidad al nivel del agua se analizó junto con el acuífero anterior, para el mismo periodo y los valores obtenidos aparecen en el mapa hidrogeológico, donde se observa que el nivel desciende, también, de norte a sur y van de los 2 220 a los 2 205 m de altura.

Los parámetros hidráulicos del acuífero se asignaron por correlación litológica de sedimentos con el resto de la parte aluvial, en esta forma, para el acuífero semiconfinado, son del orden de $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

c) **De productividad local limitada.** Esta unidad comprende los angostos valles situados al pie de la montaña, o bien son zonas aluviales intramontanas, como el valle de Zontecomate. El espesor del relleno varía de 10 a 150 m en las inmediaciones de la ciudad de Pachuca.

Límites. Estos sedimentos tienen comunicación hidráulica con los materiales de la planicie y con las rocas de la montaña, en algunos sitios se interdigitan con tobas arcillosas.

Movimiento del agua subterránea. En los valles intramontanos el agua fluye en profundidad, en los casos restantes el agua lo hace hacia el centro de la planicie. En general la profundidad al nivel de agua es mayor a 90 m.

d) **Depósitos piroclásticos semipermeables que cubren acuíferos fisurado o intergranular de productividad variable.** Estos sedimentos se ubican en el piedemonte de las sierras Tolcayuca y de los Pitos, donde se componen de depósitos limo-arenosos cubiertos por tobas semicompactas con horizontes de caliche muy compactado, y localmente existen conglomerados asignados al Grupo Tarango. Por su litología estos materiales se han considerado de poca permeabilidad y la disponibilidad de agua en ellos es muy poca, pero drenan lentamente hacia los acuíferos fisurado o intergranular.

Límites. Estos sedimentos se disponen en interdigitación con rocas volcánicas y los sedimentos de la planicie, siendo un área de circulación lenta hacia el acuífero. En las áreas donde subyacen a rocas más permeables favorecen la formación de manantiales.

Estratificado

a) **De productividad alta en rocas volcánicas.** Constituido por rocas y brechas de composición basáltica y andesítica, que se alternan con sedimentos aluviales, la textura del aluvión varía desde limos a conglomerados. En la sección hidrogeológica incluida en el mapa se muestra de arriba hacia abajo una delgada capa de aluvión y piroclastos que cubren roca volcánica, seguida de un conglomerado, rocas volcánicas y, finalmente, paquetes de arena media, gruesa y arcilla.

Esta unidad se localiza al norte de Tizayuca, en Tezontepec y en Nopalapa.

Límites. En todos los sitios donde existe esta unidad, a excepción de la parte este de Nopalapa, sus límites con las unidades a las que sobreyace o con las que se interdigita son de alimentación.

Al este de Nopalapa las rocas riolíticas forman un límite semipermeable hacia esta unidad.

Parámetros hidráulicos. Fue necesario obtener estos parámetros en campo, para lo cual hubo ciertos problemas; uno de ellos fue la relativa certeza de la columna geológica en algunos pozos. Los datos obtenidos en campo para los pozos 12B y 11 del ramal Tizayuca-Pachuca y en Nopalapa, dan valores de transmisibilidad de $2.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ a $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ($2\ 246 \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$).

Los coeficientes de almacenamiento son de $2 \cdot 10^{-3}$ y $1.5 \cdot 10^{-3}$.

Piezometría. Los niveles estáticos obtenidos en los pozos varían en función de la extracción y de su posición topográfica, así, en Nopalapa el nivel está a 2 290 m de altura, en Tezontepec a 2 220 y al norte de Tizayuca entre 2 230 y 2 210 m de altura.

Movimiento del agua subterránea. Esta unidad constituye pequeños parteaguas, pues el nivel del agua en esta unidad está ligeramente más elevado que el de la planicie, las isopiezas trazadas muestran que el nivel más bajo es hacia Tizayuca y Zumpango a 2 210 y 2 205 m de elevación, respectivamente.

Funcionamiento del sistema

El sistema acuífero de la zona en cuestión está constituido por varias unidades acuíferas relacionadas directamente entre sí. El agua que circula por el acuífero fisurado entra al acuífero intergranular de productividad variable y forma la principal recarga de esta unidad. En los sedimentos piroclásticos el agua circula más lentamente y se infiltra, según sus relaciones estratigráficas, en la unidad fisurada o en la intergranular. En el acuífero fisurado y particularmente en la Sierra de Pachuca existen zonas de descarga a diferentes alturas, destacando las del Cerezo y las Ventanas, a 2 900 m de altura, la Estanzuela a 2 750 m, entre otras; estas descargas son capturadas para un uso doméstico.

La superficie de la cuenca del Río de las Avenidas constituye una extensa zona de recarga que comprende todas las unidades acuíferas descritas. La zona de descarga existente es de forma artificial, pues no hay manifestaciones de descarga natural en la planicie.

La lluvia constituye la alimentación esencial del acuífero fisurado. La recarga lateral y la lluvia alimentan al acuífero intergranular.

Balance del agua subterránea

La evaluación del agua subterránea que se tiene de esta cuenca es de carácter preliminar e incompleta, debido a que existen deficiencias en la generación de los datos necesarios para este fin, como son:

- a) La pequeña densidad de estaciones climatológicas que registren datos de lluvia, temperatura y evaporación, entre otras, razón por la cual esos valores fueron calculados teóricamente.
- b) La cuantificación del escurrimiento superficial es igualmente importante. Para esta región la estación hidrométrica se ubica varios kilómetros aguas arriba del sitio adecuado, omitiéndose, así, gran parte del escurrimiento de la cuenca, necesario para el balance.
- c) Es sumamente importante y necesario cuantificar el volumen de agua residual que se vierte a los cauces, esto permitirá separar el escurrimiento artificial del drenaje natural y conocer el volumen del escurrimiento superficial en época húmeda.
- d) No se conocen con certeza los volúmenes de extracción y el de los diferentes manantiales para el uso doméstico.
- e) Falta por aplicar un modelo matemático que ayude a calibrar las variables de recarga y descarga del acuífero y a cuantificar las que faltan por conocer.

Los valores obtenidos para los acuíferos en explotación son los siguientes:

Entradas	Salidas
Lluvia efectiva ... 389 MM ³	Evapotranspiración... 304 MM ³
Agua de riego... 3 MM ³	Bombeo..... 111 MM ³ (*)
Total 392 MM ³	Esc. Superficial... 5 MM ³
	Total 420 MM ³

(*) Censo realizado en esta investigación e información proporcionada por la GAVM.

6. Calidad del agua subterránea

Los parámetros físicos: temperatura, pH y conductividad se registran en campo, en el laboratorio se determinó la composición química de estas aguas.

La temperatura presenta oscilaciones durante el año, así, el agua en los manantiales tiene 10°C en invierno y 18°C en verano. En los pozos, a excepción de los Téllez núms. 4 y 5, que tienen temperaturas de 38°C, varía de 18 a 24°C, respectivamente.

En la mina de San Juan Pachuca (Tulipán) la temperatura del agua es de 39°C y en el Parícutin de 55. Estos valores indican que en esta cuenca la temperatura del agua está en relación directa con la del medio ambiente, y los casos con temperaturas superiores a 30°C indican la presencia de aguas termales con variación en su concentración mineral.

El análisis de la conductividad del agua facilita la diferenciación de los tipos de agua, así, en la **figura 10**, se observa que la conductividad se incrementa de la periferia hacia el centro de la planicie cuyos valores varían de 400 a 1 300 micromhos/cm. Los valores más pequeños corresponden a agua poco mineralizada, es decir, de buena calidad y los más altos indican un agua de menor calidad, como sucede en los pozos Téllez (3, 4 y 5) y Prodel No. 2.

Las mayores conductividades se dan en la mina El Alamo con 2 000 micromhos/cm, en los pozos 26, 24 y 18 donde son muy cercanas a 1 000 micromhos/cm.

Respecto a los sólidos disueltos la **figura 11** muestra una distribución muy similar a la conductividad del agua, es decir, a menor conductividad menor cantidad de sólidos disueltos y viceversa. La configuración de las isolíneas permite trazar las direcciones locales y regionales del agua subterránea en esta zona. Los sólidos varían de 350 a 800 ppm, en pozos, y hasta 1 935 ppm en el tiro Parícutin. En cuanto a la mineralización del agua, la **tabla 1** muestra 30 análisis químicos de agua representativos de esta zona, y se aprecia que las concentraciones corresponden con aguas que circulan en rocas volcánicas. El magnesio siempre es el doble del calcio. El sodio supera al magnesio y al potasio, los valores de cloro son relativamente altos, principalmente en la zona de Téllez, pozos 31', 36, 36' y en Temascalapa pozo 26, donde la mineralización está aumentando, y su representación en el diagrama Piper.Hill.L, manifiesta una mezcla de aguas (**figura 12**) cuyo origen puede ser contaminación con agua residual utilizada para irrigación, producto de evaporación de agua o de origen volcánico.

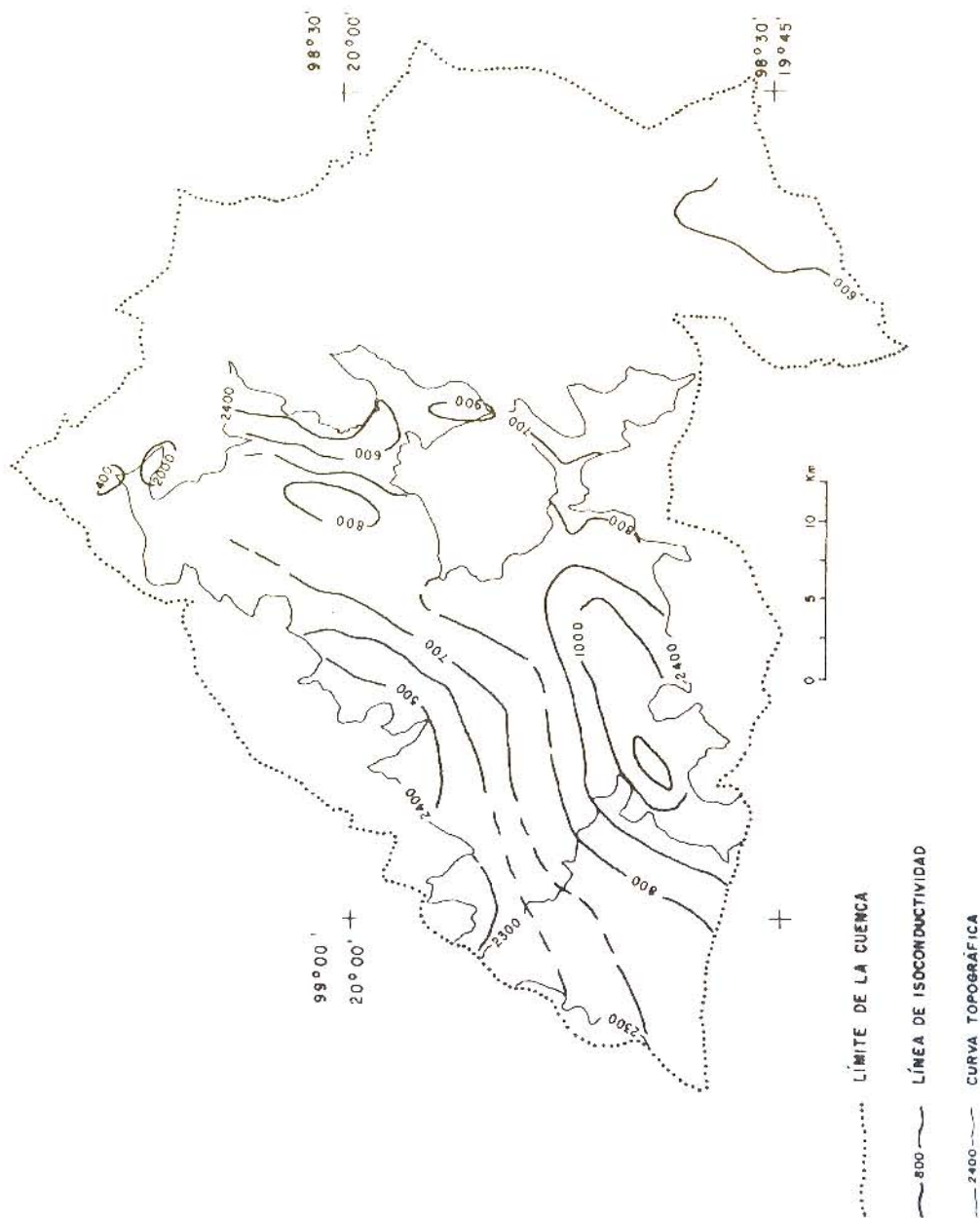


Figura 10. Distribución de la conductividad.

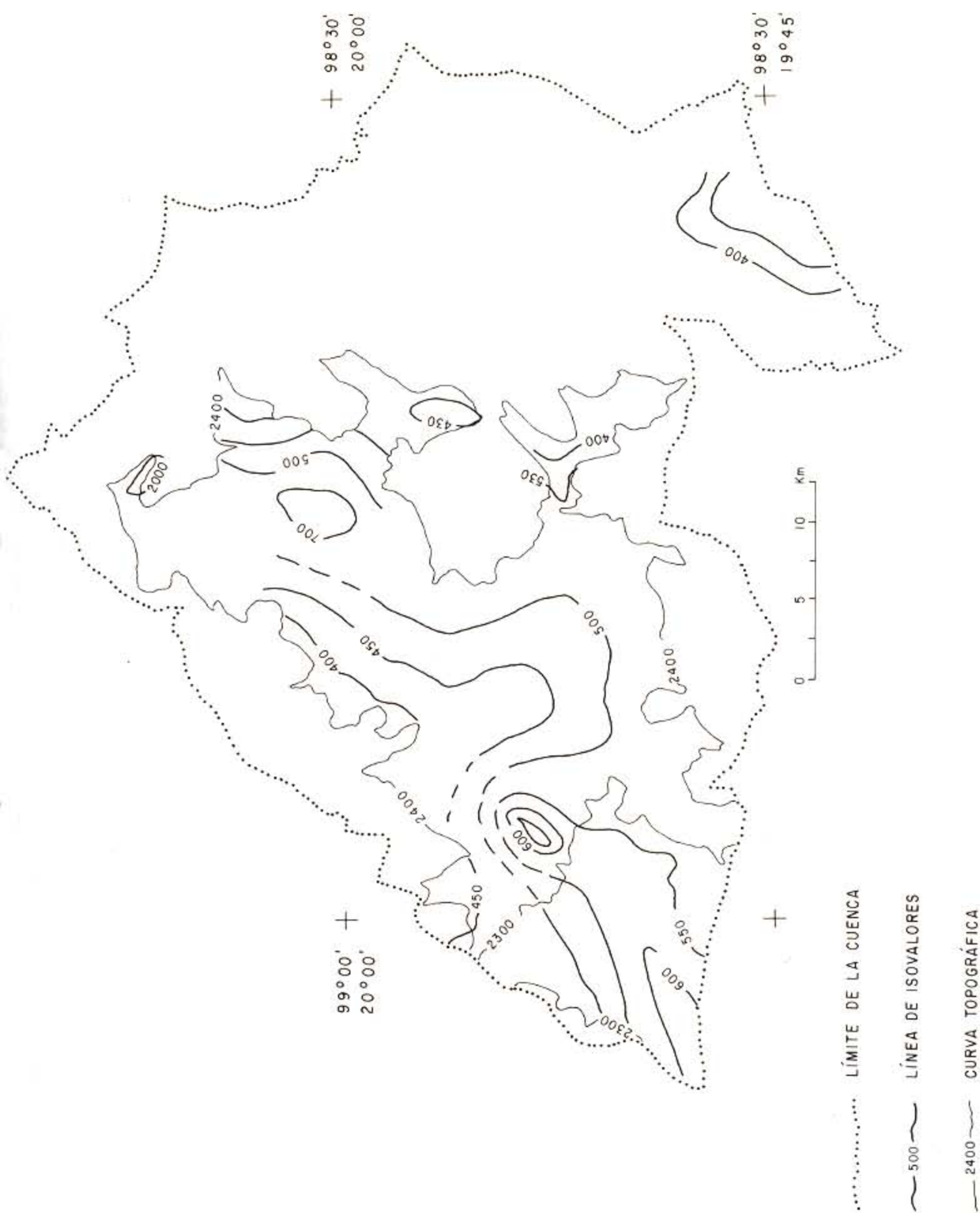


Figura 11 Concentración de sólidos disueltos

Tabla 1. Principales parámetros químicos de pozos en la cuenca Río de las Avenidas Pachuca, Hgo. (valores en ppm)

Número en el mapa	pH	Conductividad en Micromhos/CM	Ca++	Mg++	Na+	K+	CO--	HCO3--	Cl--	SO4-	NO3-	NO2	PO4	Fe	Mn	Sólidos disueltos	B	Cu	Co	Cr	Zn	pB	Cd
92	8.40	340.00	26.88	18.43	26.38	9.01	13.20	254.98	36.81	24.48	1.84	0.02	0.27	0.018	0.003	281	0.030	0.007	0.003	0.001	0.018	0.000	0.001
35	8.40	910.00	22.00	55.49	101.38	26.60	79.20	402.60	64.40	41.28	2.64	0.00	0.04	0.050	0.003	500	0.110	0.007	0.013	0.005	0.007	0.025	0.001
29	7.70	640.00	39.60	65.28	51.98	12.17	52.80	389.18	55.20	74.02	1.28	0.03	0.09	0.006	0.006	425	0.040	0.002	0.006	0.003	0.017	0.013	0.001
30	8.30	620.00	39.60	42.38	49.98	12.01	39.60	348.92	42.95	82.08	1.76	0.06	0.05	0.032	0.017	579	0.000	0.027	0.010	0.002	0.014	0.035	0.001
24	7.80	930.00	22.00	58.03	88.00	19.81	66.00	523.38	97.16	172.80	2.56	0.12	0.04	0.015	0.003	656	0.070	0.003	0.003	0.003	0.000	0.050	0.001
23	9.40	350.00	8.80	25.25	17.00	40.01	0.00	241.56	71.00	57.60	2.44	1.15	0.20	0.009	0.007	308	0.010	0.003	0.010	0.003	0.002	0.025	0.001
86	8.40	900.00	48.40	87.98	97.98	20.40	39.60	469.70	42.95	419.04	2.96	0.03	0.07	0.011	0.002	410	0.180	0.012	0.009	0.005	0.068	0.063	0.002
85	8.20	1 900.00	39.60	44.93	95.98	24.41	66.00	469.70	64.38	65.76	2.88	0.05	0.10	0.009	0.002	600	0.120	0.002	0.007	0.003	0.002	0.037	0.002
25	8.40	700.00	56.00	52.80	58.99	23.20	39.60	348.92	106.50	98.69	6.36	1.62	0.12	0.028	0.002	645	0.000	0.026	0.019	0.003	0.049	0.037	0.002
88	7.70	580.00	39.60	24.58	55.98	13.81	0.00	308.66	55.20	115.20	2.36	0.03	0.24	0.041	0.003	428	0.060	0.010	0.010	0.003	0.012	0.025	0.001
89	8.10	670.00	42.24	28.66	81.01	17.39	26.40	281.82	1.35	57.55	1.76	0.01	0.17	0.091	0.005	570	0.190	0.019	0.008	0.005	0.007	0.025	0.001
20	8.40	480.00	38.40	15.84	67.99	20.01	39.60	295.24	92.30	74.02	2.64	0.02	0.00	0.038	0.006	530	0.060	0.012	0.008	0.005	0.012	0.012	0.001
83	8.20	790.00	60.00	41.76	64.01	15.01	39.60	228.14	166.85	74.02	3.32	0.83	0.05	0.091	0.003	720	0.010	0.017	0.034	0.005	0.017	0.025	0.002
66	8.30	920.00	61.44	45.22	83.01	15.79	39.60	228.14	184.60	370.13	2.72	1.26	0.12	0.103	0.007	845	0.110	0.026	0.041	0.003	0.014	0.037	0.002
80	8.40	590.00	39.60	19.49	71.99	15.17	26.40	335.50	58.29	230.30	3.04	0.12	0.05	0.003	0.001	480	0.040	0.002	0.009	0.003	0.002	0.025	0.001
22	8.40	790.00	26.88	74.59	121.00	25.19	92.40	469.70	110.05	213.84	1.08	0.05	0.05	0.889	0.034	685	0.230	0.014	0.015	0.003	0.015	0.049	0.002
62	8.50	470.00	23.04	22.90	56.99	15.37	26.40	281.82	63.90	90.48	3.32	0.06	0.02	0.022	0.003	445	0.070	0.079	0.011	0.008	0.026	0.062	0.001
63	8.00	750.00	46.08	41.47	81.01	16.57	79.20	496.54	81.65	98.69	1.88	0.03	0.07	0.019	0.006	630	0.140	0.051	0.015	0.005	0.035	0.037	0.002
82	8.20	500.00	30.72	35.57	44.00	11.58	52.80	375.76	67.45	115.15	2.96	0.47	0.14	0.053	0.007	235	0.070	0.017	0.011	0.003	0.045	0.111	0.001
26	8.50	750.00	38.40	48.24	80.41	17.78	52.80	469.70	79.73	172.32	2.92	0.05	0.18	0.071	0.003	617	0.040	0.009	0.010	0.005	0.024	0.012	0.002
81	8.10	330.00	19.20	16.56	33.19	12.79	39.60	228.14	64.45	115.15	0.32	0.00	0.07	0.031	0.052	345	0.040	0.012	0.004	0.003	0.036	0.037	0.001
14	8.20	620.00	23.04	40.18	69.99	16.61	26.40	348.92	74.55	32.88	1.52	0.06	0.03			160	14.000	0.014	0.015	0.008	0.021	0.025	0.000
93	8.20	90.00	17.60	5.28	5.38	1.36	0.00	93.94	49.06	82.27	0.16	0.00	0.04	2.877	0.105	175	0.000	0.274	0.006	0.355	2.016	0.861	0.009
94	8.20	70.00	8.00	10.32	3.79	1.60	0.00	67.10	58.29	65.81	0.52	0.02	0.04	0.214	0.016	175	0.040	0.009	0.009	0.003	0.024	0.000	0.001
95	8.00	190.00	24.20	7.20	11.38	6.59	0.00	107.36	33.72	41.08	6.16	0.00	0.07	0.324	0.011	218	0.000	0.007	0.000	0.008	0.014	0.052	0.001
97	8.30	320.00	32.00	132.00	12.93	8.38	24.48	149.22	33.22	616.80	6.16	0.00	0	0.08	0.01	195	0.25	0.014	0.019	0.003	0.05	0.038	0.001
99	8.00	1 000.00	96.00	18.00	58.00	6.20	0.00	111.99	35.78	353.28	0.00	0.00	0.05	0.08	0.57	948	0.03	0.01	0.001	0.002	0.015	0.106	0.001
100	6.50	2 200.00	288.00	86.40	328.00	34.40	0.00	124.44	69.01	1 036.32	0.16	0.02	0.05	0.01	0.01	1 935	0.04	0.003	0.008	0.002	0.007	0.018	0
90	8.00	320.00	24.00	6.24	68.00	0.60	0.00	124.44	33.22	312.48	0.16	0.00	0.04	0.37	0.19	135	0.02	0.021	0.015	0.004	0.437	0.106	0.004
91	8.00	320.00	4.00	6.24	68.00	0.60	0.00	93.94	53.25	320.78	0.16	0.03	0.00	0.094	0.018	420	0.010	0.009	0.008	0.003	0.016	0.025	0.001

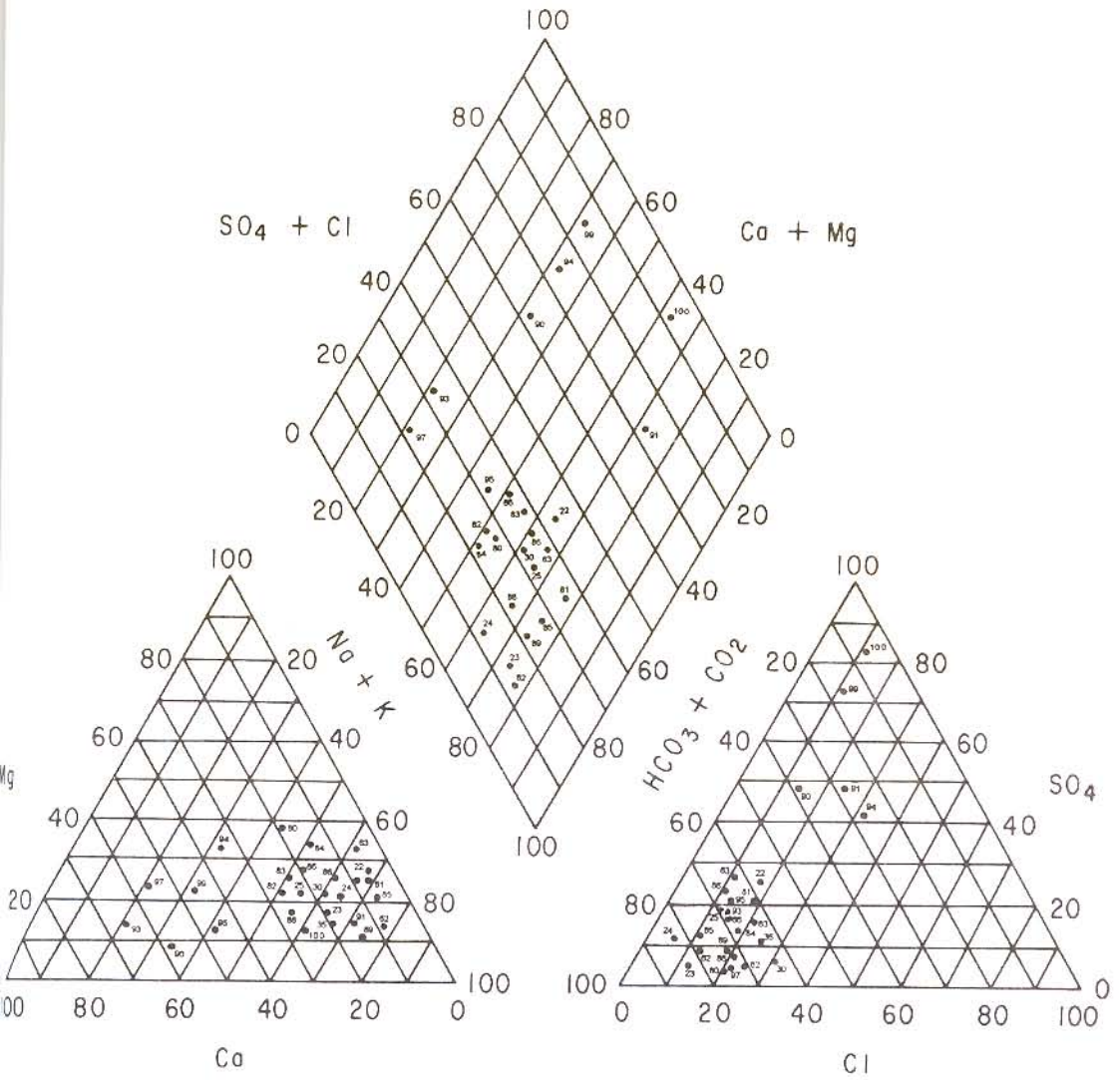


Figura 12. Facies hidroquímicas de agünos pozos.

Respecto a los elementos pesados y según la norma para agua potable de la WHO (1984), prácticamente todos los pozos analizados cumplen con dicha norma, no obstante, existen varios cuyo contenido en alguno de estos elementos es sensiblemente superior a lo permitido, sobresaliendo las muestras: 27, 40, M 11 y Parícutin (**tabla 1**).

La clasificación del agua en función de los iones principales son:

1. Bicarbonatada-sódica

2. Bicarbonatada-calcio-magnésica

3. Clorurada-sódica

Para resumir se puede decir que las aguas subterráneas son de buena calidad para cualquier uso, excepto aquéllas de las muestras indicadas que habrá que potabilizar previamente.

Situación actual de la calidad del agua subterránea

La agricultura con riego al sur de la ciudad de Pachuca se practica desde hace varias décadas, y para ello se utiliza el agua residual de esta ciudad, más el excedente de las minas de Pachuca Real del Monte. En la zona de Zumpango, por otra parte, se emplea agua residual de la ciudad de Tizayuca. Esta práctica económica está propiciando sensibles cambios en la composición química del agua subterránea, tal como lo muestra el aumento de las conductividades y los sólidos en las zonas de Téllez y en Tizayuca lo que traerá en el corto plazo la alteración de la calidad natural del agua.

Un segundo factor contaminante, de importancia, es la aplicación de fertilizantes químicos.

Directrices de acción en relación con la calidad de las aguas subterráneas

Con el fin de proteger los acuíferos se recomienda lo siguiente. Dar asesoría tecno-agrícola a los agricultores acerca del tipo y dosis de fertilizantes a utilizar para evitar contaminación del agua subterránea. Dar tratamiento de depuración a las aguas residuales de esta zona, destinadas al riego, considerando la intención de que es agua de importancia para el riego y

que posee un beneficioso contenido de fertilizantes naturales y, por último, que es agua de la cual parte se infiltra y funge como recarga complementaria del acuífero.

El balance expuesto en páginas anteriores tiene resultado negativo de un metro por año, por lo que sería deseable disminuir o, al menos estabilizar, el abatimiento del acuífero evitando el incremento de la extracción, y con ello prevenir el incremento futuro en los costos de la extracción. Para lograr este cometido, es necesario reducir el crecimiento urbano a través de la aplicación de planes de desarrollo urbano controlado.

Propuesta de acciones futuras

La gestión de los recursos de agua subterránea en esta zona deberá perseguir los siguientes objetivos.

Optimizar el uso del agua subterránea con su calidad apropiada para los usos a que sea destinada.

El uso actual del agua en la región es principalmente de tipo doméstico-industrial, por tal motivo se debe recomendar tanto a las industrias como a los municipios, que lleven a cabo prácticas de tratamiento y reuso de sus aguas, con el fin de no incrementar la extracción en los acuíferos. Esto coadyuvará también a prevenir, en primera instancia, la futura contaminación del agua subterránea, en las inmediaciones de las zonas urbanas, donde se evacua agua residual sin ningún control, contaminando inmediatamente el agua superficial.

Para lograr lo anterior, será necesario e importante realizar una labor de asesoramiento a los municipios para que los residuos sólidos y líquidos se viertan en forma controlada y en sitios técnicamente adecuados. Exigir a la industria la correcta depuración de sus efluentes y delimitar perímetros de protección a las captaciones destinadas al consumo humano.

Para mejorar el manejo de los recursos hídricos subterráneos es fundamental tener control de los mismos y, con este propósito, se sugiere medir continuamente los manantiales y norias del área; equipar con medidores a todos los pozos para controlar su gasto; completar el mapa con los resultados de nuevas perforaciones, positivas o negativas, que permitan redefinir la geometría del acuífero, sin olvidar la importancia de obtener los parámetros hidráulicos del pozo.

Referencias

- Blázquez, L., Geohidrología de la Cuenca de México, Instituto Geológico, México, 1956, 77 págs. (inédito).
- Cserna, Z. de *et al.*, Estructura geológica, gravimetría, sísmica y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México, *Boletín*, núm. 104, Instituto de Geología, UNAM, México, 1987, 76 págs.
- Estudios y Construcciones Alas, S.A., Perfiles geofísicos en diferentes zonas de la Cuenca del Valle de México, SARH, Comisión de Aguas del Valle de México, Contrato 83-418, 1983.
- Fries, C. Jr., Hoja Pachuca 14Q-e(11), con resumen de la Hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México, Carta Geológica de México, Serie de 1: 100 000, mapa con texto al reverso, Instituto de Geología, UNAM, México, 1962.
- Geyne, A.R., C. Fries Jr., Segerstrom K., R.F. e I.F. Wilson, Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca-Real del Monte, estado de Hidalgo, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, pub. 5E, México, 1963, 222 págs.
- Huizar-Álvarez, R., Simulación matemática del sistema acuífero de la Cuenca de Chalco-Amecameca, *Revista Geofísica Internacional*, vol. 32, núm. 1, UNAM, México, 1993.
- Huizar-Álvarez, R., Algunas características hidrogeológicas de la Sierra de Pachuca, Hgo., México, GEO Unión Geofísica Mexicana, *Boletín Informativo*, época II, vol. 12, núm. 5, Puerto Vallarta, Jalisco, 1992, págs. 39-40.
- Instituto de Geología, UNAM, Geología en el Valle de México con fines geohidrológicos, SARH, Comisión de Aguas del Valle de México, Contrato CAVM, núm. 85-405, 1986, 205 págs. y 22 mapas.
- Ledezma-Guerrero, O., Hoja Calpulalpan 14Q-h(3), con resumen de la geología de la Hoja Calpulalpan, estados de Hidalgo, México y Tlaxcala, Instituto de Geología, UNAM, Carta Geológica de México, Serie de 1: 100 000 mapa con secciones y texto, 1987, 12 págs.
- Marín Córdova, S., Sistemas mayores de fallamientos en la Cuenca de México, VIII Conv. Nacional Soc. Geol. Mexicana, *Mem., Resúmenes*, 1986, págs. 209-212.
- Marín, C. *et al.*, IV.6.3 Hidrogeología. Naturaleza, tomo II, 6. Hidrogeografía, Instituto de Geografía, UNAM, Atlas Nacional de México, mapa escala 1: 4 000 000.
- Mooser, F., Historia geológica de la Cuenca de México, en *Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal*, tomo 1, Depto. del Distrito Federal, México, 1975, págs. 7-38 y mapa geológico.

TACSA, Prospección geohidrológica y trabajos electromecánicos, Compañía Real del Monte y Pachuca, S.A. de C.V., Contrato tomo I-VIII, 1986.

SARH, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, *Boletín Hidrológico*, núms. 25-40, 1973-1988.

Datos estadísticos:

SARH, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.

Boletín de Mecánica de Suelos, núms. 7-10. Datos del Valle de México, periodo 1970-1987.

Cartografía de apoyo:

Comisión de Estudio del Territorio Nacional

Cartas geológicas escala 1:50 000

Hoja Apan, Hgo., E 14 B22. 1983

Hoja Ciudad Sahagún, Hgo. E14B12 1975

Hoja Tizayuca, Hgo. E14B11 197

Hoja Pachuca, Hgo. F14D81 1984

Hoja Zumpango, Méx. E14A19 1978

Agradecimientos

El autor desea expresar su más sincero reconocimiento a las personas sin las cuales la realización de la presente investigación no hubiera sido posible. A las autoridades del Instituto de Geología de la UNAM, por el apoyo logístico y financiero. A los ingenieros E. Sahab H., X. Aro, D. Arcos y H. Chaoul, de la gerencia de Aguas del Valle de México, quienes facilitaron información hidrogeológica muy importante. A las autoridades de la Compañía Minera Real del Monte y Pachuca, en especial al ingeniero De la Luz-Bucio quien orientó y acompañó al autor a las galerías mineras de mayor interés hidrogeológico, asimismo por facilitar información hidrogeológica del área minera. Al ingeniero J. Garza quien dio todas las facilidades para obtener parámetros hidráulicos de algunos pozos. Al doctor Luis M. Mitre por sus observaciones en la redacción, y al ingeniero Julián Núñez quien colaboró con el autor en la primera etapa del estudio.