

HIDROGEOLOGÍA DE LA SUBCUENCA DE APAN-TÓCHAC, ESTADOS DE HIDALGO Y TLAXCALA, MÉXICO

Rafael Huizar-Álvarez*

RESUMEN

Este estudio presenta el modelo hidrogeológico de la subcuenca Apan-Tóchac, apoyado en la información geológica y sondeos geoelectrónicos, interpretados estos últimos con la descripción litológica de tres perforaciones. De esta forma, se reconoció y cartografió los siguientes acuíferos: (i) intergranular, (ii) fisurado y (iii) mixto. Estos tres acuíferos tienen relación hidráulica. El primero forma la zona de descarga, es de tipo semiconfinado hacia el centro de la planicie Tóchac y de condición libre hacia la periferia de la misma. Los dos últimos se localizan en la zona de recarga principalmente.

Los valores de la conductividad hidráulica son: $3 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ a 10^{-4} ms^{-1} para el intergranular, $3 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ para el fisurado, el tercero no tuvo datos, pero se le asignó un valor de $2 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$.

El análisis de los aniones y cationes del agua subterránea indica que por su mineralización existen en esa subcuenca dos facies hidroquímicas: (a) baja mineralización, que corresponde a la zona de recarga, y (b) alta mineralización, correspondiente a la zona de descarga, manifestando la dirección del flujo del agua subterránea. Asimismo, de acuerdo con la norma de calidad del agua (mexicana y de la Organización Mundial de la Salud), el agua de esta área es de buena calidad para consumo humano; sin embargo, la presencia de Pb y Cr en el agua de varios pozos, manifiesta que es preciso iniciar acciones para proteger los acuíferos y prevenir posibles daños en la salud de la población de esta zona.

El balance hidrogeológico preliminar muestra que el sistema acuífero de esta subcuenca está casi en equilibrio.

Palabras Clave: Cuenca de México, subcuenca Apan-Tóchac, mapa hidrogeológico, calidad del agua, transmisividad.

ABSTRACT

This study presents the hydrogeologic model of the Apan-Tóchac sub-basin, obtained from geologic and geoelectric soundings. These data were interpreted with the lithological description of three well-logs. This information allows to identify and map three different aquifers: intergranular, fissure and mixed. These three aquifers are hydraulically connected. The first one is located in the discharge zone and has semi-confined conditions in the center of the Tóchac plain and is unconfined toward the periphery of the same plain. The other two aquifers are located mainly in the recharge zone.

The hydraulic conductivity values are: $3 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ a 10^{-4} ms^{-1} for the intergranular aquifer, $3 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ for the fissured and the third aquifer has not data available but it is assigned a value of $2 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$.

The chemical analyses of groundwater (anions and cations) indicate that its mineralization forms two hydrochemical facies: a low mineralization facies corresponding to the recharge area, and a high mineralization facies corresponding to the discharge zone. The results also show that groundwater is of good quality for human consumption (Secretaría de Salubridad y Asistencia, and the World Health Organization), except for the concentrations of lead and chromium due to incipient contamination. Therefore, it is necessary to start actions to protect the aquifers and to foresee possible damages in the health of the inhabitants of the region, which use this groundwater.

The preliminary hydrogeologic balance shows that the aquifer system of this sub-basin is almost in equilibrium.

Key words: Mexico basin, sub-basin of Apan-Tóchac, hydrogeologic map, water quality, transmissivity.

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable en México ha tomado una proporción crítica, los pueblos están envueltos en la difícil y desigual situación que establece la oferta y la demanda de este líquido, motivando una situación que favorece la dificultad del uso racional.

La subcuenca de Apan-Tóchac es un ejemplo de la creciente población que demanda agua para uso doméstico y agrí-

cola. Es también un ejemplo de la falta de estudios hidrogeológicos apoyados en una base de datos fiable, y enfocados a conocer la disponibilidad de agua y su uso racional, pues a pesar de la cantidad de aprovechamientos existentes, en el 95% de los casos no hay información hidrogeológica que permita conocer las características del acuífero. El uso del suelo propicia que sólo en las partes altas del relieve exista cubierta vegetal arbórea, mientras que la planicie y el piedemonte están ocupados por la agricultura de temporal; la agricultura de riego, además de reducida, es afectada por duras heladas durante la época seca.

*Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, 04510 D.F., México

En la actualidad, esta subcuenca sustenta una actividad agrícola tradicional y pequeñas áreas de riego, actividades con las que coexiste una creciente actividad de servicios, en varios poblados, cuya agua residual se vierte, sin previo tratamiento, en los arroyos por donde fluye hacia lagunas de oxidación implicando un fuerte potencial contaminante del agua subterránea de esta zona, lo que se refleja en el lamentable estado del agua superficial.

De los trabajos previos a la presente investigación, se tenía la geología superficial elaborada por DETENAL (1975) y el INEGI (1983, 1985a, 1985b), Ledezma-Guerrero (1987) y Mooser (1975). La Comisión de Aguas del Valle de México (SARH, 1983) realizó tres secciones de resistividad eléctrica, de las que se infiere la litoestratigrafía de la parte septentrional de la planicie hasta una profundidad de 400 m. Las secciones se realizaron por el método Wenner con abertura eléctrica A-B de hasta 3,000 m. Rodríguez-Castillo y Ochoa (1989) repitieron una de las secciones eléctricas.

Respecto al agua subterránea, sólo existía una descripción hidrogeológica de toda la cuenca de México, por Blázquez (1956), y un reporte técnico por la SARH (1981), que presenta algunos datos químicos e hidráulicos de esta área. Asimismo, de 1973 a 1988 la SARH realizó mediciones trimestrales del nivel estático del agua en algunos pozos de esa zona, con las cuales obtiene cartas piezométricas anuales.

Con base en estos antecedentes, los objetivos de este estudio son conocer la estructura y el comportamiento hidrogeológico de la subcuenca de Apan-Tóchac, sus características hidroquímicas y obtener el mapa hidrogeológico de la misma.

LOCALIZACIÓN

Hidrologicamente, el área de Apan-Tóchac es una subcuenca de la cuenca de México y se ubica en la parte nororiental (Figura 1); tiene 1,480 km² de superficie, de los cuales el 28% corresponde a la zona plana y el resto al relieve de montaña. Hasta principios del presente siglo, el área en estudio era una subcuenca endorreica; desde entonces, drena hacia la subcuenca de Pachuca en forma artificial.

El relieve volcánico de las sierras de Río Frio, Tepozán y de Apan, que limitan esta subcuenca, presenta una morfología de estructuras montañosas con laderas muy disecadas, a veces escarpadas y con elevaciones de 3,700 m s.n.m., en Río Frio y 4,000 en el Tepozán; otras veces, volcanes de escoria o de lava con incipientes rasgos de erosión.

El relieve de la planicie de piedemonte está disecado por profundos barrancos que alcanzan hasta 120 m de profundidad, dispuestos en forma paralela. En la parte SW del área, los barrancos presentan asimetría de sus vertientes y, de acuerdo con Ortiz-Pérez (1987), Huizar-Álvarez (1981) y Huizar-Álvarez y

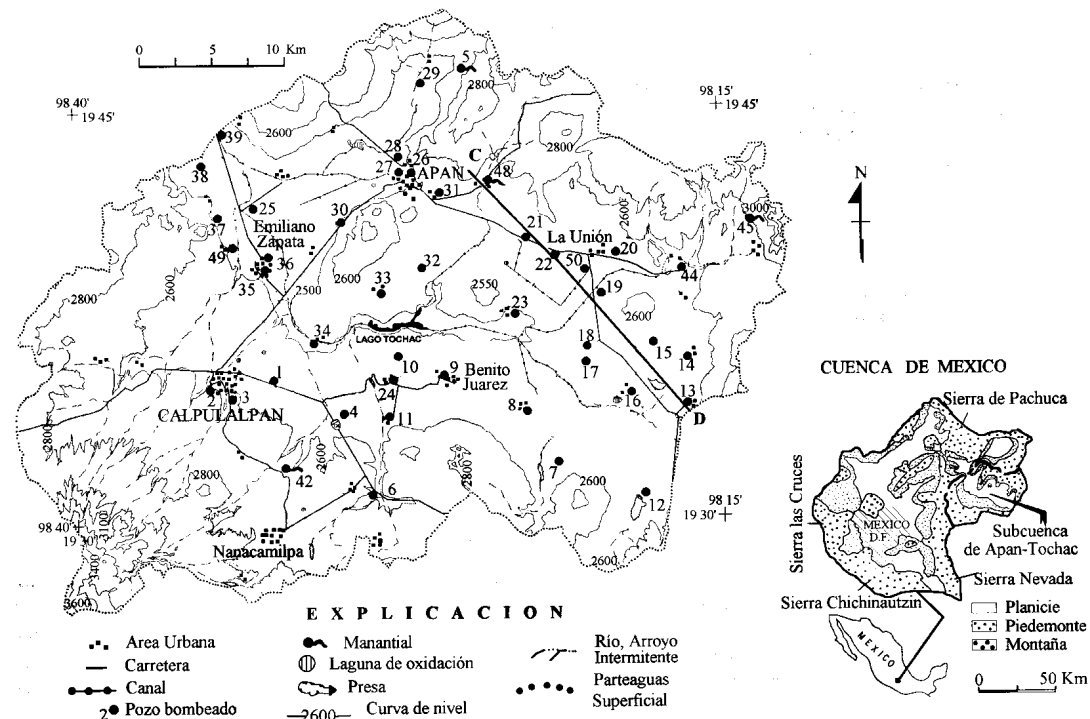
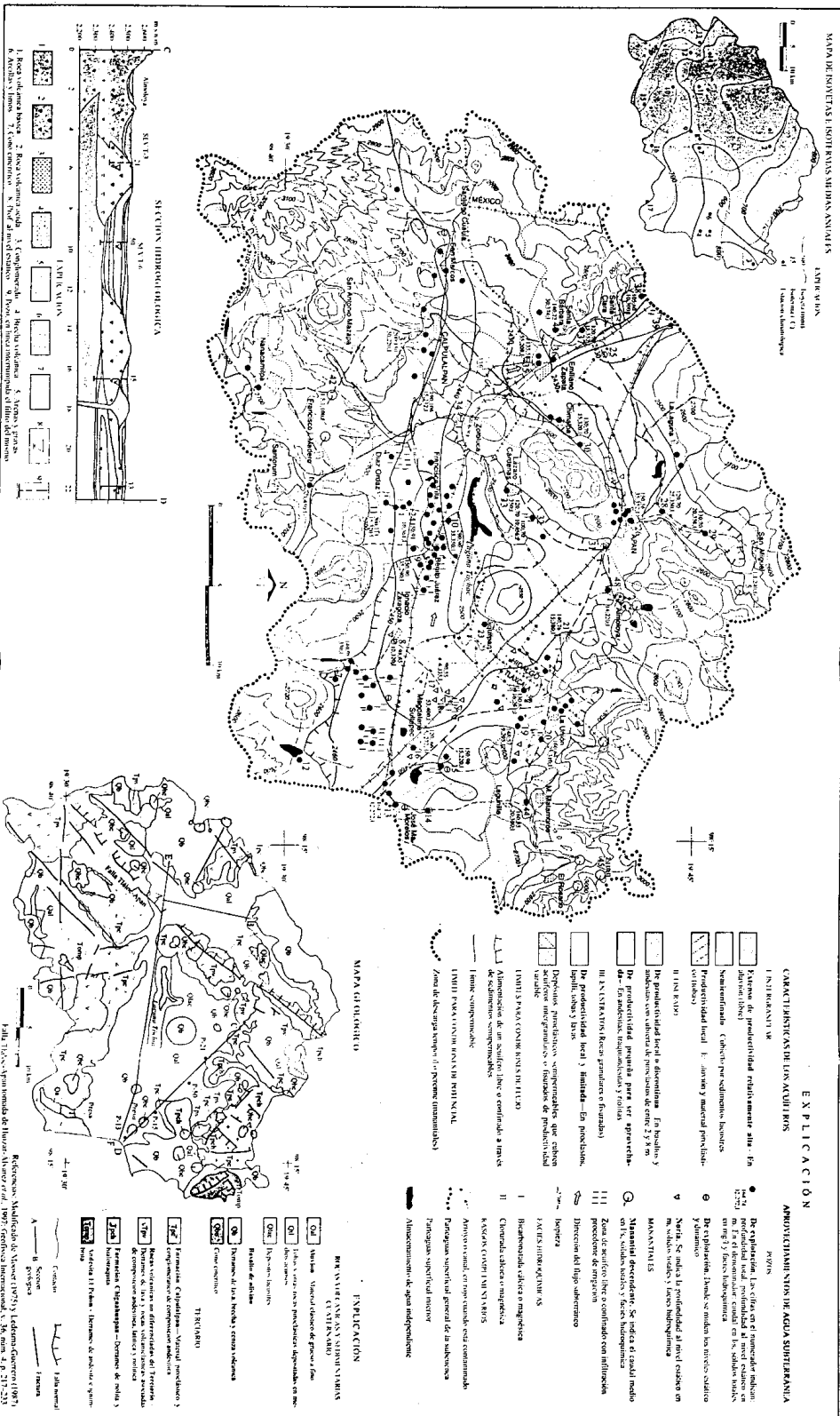


Figura 1. Localización de la Subcuenca de Apan-Tóchac, mostrando la ubicación de los pozos para agua potable monitoreados durante esta investigación.



CARTA HIDROLOGICA DE LA SIERRA DE SAN JUAN DE LOS RIOS, ESTADOS DE HIDALGO Y TLAXCALA, MEXICO

García (1996), esta asimetría es producto de cambios en el nivel de base local, donde la tectónica tiene un papel importante.

La planicie de nivel de base local se extiende de W a E, desde Buenavista hasta Cd. Sahagún, con una elevación promedio de 1,495 m s.n.m., interrumpida parcialmente por los cerros de Apan, que forman un pequeño parteaguas.

METODOLOGÍA

Para el análisis hidrogeoquímico, se realizaron análisis físico-químicos de muestras de agua de 47 sitios (39 pozos, cuatro manantiales y cuatro norias) (Figura 1). Los sitios forman el 80% de los aprovechamientos subterráneos del área y fueron seleccionados de manera aleatoria. Los muestreos se realizaron trimestralmente, de noviembre de 1993 a noviembre de 1994.

Los análisis químicos se efectuaron de acuerdo con la APHA-WWA-WPCF (1986) y la US-EPA (1984). La temperatura, conductividad eléctrica y pH se midieron *in situ*, siendo corroborados posteriormente en laboratorio.

Parámetro analizado	Método analítico
Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Absorción atómica de flama
Na ⁺ , K ⁺	Flamometría
CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	Titulación con H ₂ SO ₄ 0.01 N
Cl ⁻	Titulación empleando AgNO ₃ 0.005N
SO ₄ ²⁻	Gravimétrico y turbidimétrico
NO ₃ ⁻	Método de la brucina

Respecto a los análisis bacteriológicos, se determinaron coliformes totales por el método del número más probable, y los mesófilos por el método de Rodier (1990).

El diagrama de Schoeller (1955) se utilizó para representar la composición y calidad del agua; también, se evaluó la calidad para fines agrícolas de la misma.

La geología superficial de los estudios existentes se adecuó para elaborar la carta geológica del área. La geología del subsuelo y las secciones hidrogeológicas se elaboraron a partir de tres secciones de resistividad eléctrica proporcionadas por la SARH (1983), complementadas con seis sondeos eléctricos verticales realizados durante esta investigación, aplicando un arreglo Schlumberger. La interpretación litológica de los datos geofísicos se apoyó en los cortes litológicos y registros eléctricos de tres pozos perforados en la planicie a 150 m de profundidad (Figura 2). Esto permitió interpretar el marco geológico del subsuelo y definir los tipos de acuíferos que aquí existen.

Los parámetros hidráulicos de los acuíferos se dedujeron a partir de ocho pruebas de bombeo realizadas sin pozos de observación, debido a que, en la mayoría de los casos, la distancia promedio entre los pozos excede los 400 m. Para interpretar los datos de las pruebas de bombeo y obtener las características hidráulicas de los acuíferos, se combinaron las técnicas de Cooper-Jacob (1946) y Girinski *in* Castany (1971).

La precipitación y la evapotranspiración real se calcularon con base a los datos registrados por la SARH en 15 estacio-

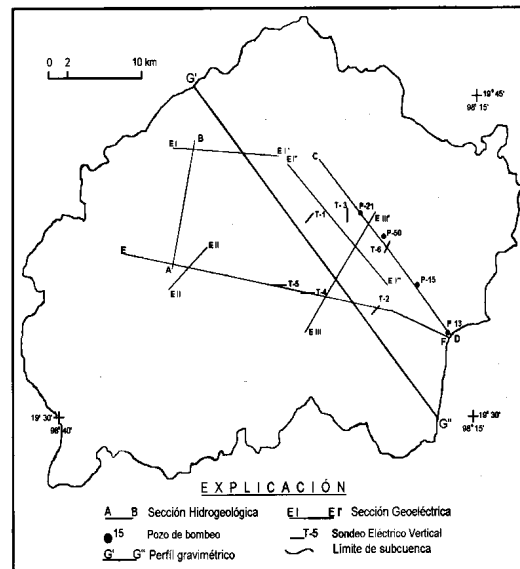


Figura 2. Ubicación de las secciones geoeléctricas, los sondeos eléctricos verticales y las secciones hidrogeológicas.

nes meteorológicas, en el periodo de 1970 a 1988, mediante las fórmulas de Thiessen (1911), Turc (1954) y Penman (1948), respectivamente.

El escurrimiento superficial se evaluó con base en datos obtenidos por la SARH en dos estaciones hidrométricas, durante 1970-1988.

La interpretación e interrelación de toda esta información permitió elaborar la carta hidrogeológica de Apan-Tóchac apegada a las recomendaciones de la UNESCO (1983) y Struckmeier y Margat (1995).

ESTRATIGRAFÍA

En este estudio se adoptaron las unidades litoestratigráficas que para esta zona definió Ledezma-Guerrero (1987), quien se apoyó en estudios previos de Bryan (1948), Fries (1962), Geyne *et al.* (1963), y Mooser (1975). Ver mapa geológico en la carta hidrogeológica (Lámina 1).

SISTEMA TERCIARIO

Andesita El Peñón (Tomvp). Son derrames de andesita y andesita con fenocristales de plagioclasa. Ambas andesitas subyacen a derrames de riolita con estructura fluidal. Al NE del área en el cerro El Rosario, las riolitas presentan en sus fracturas costras de halita. Cubriendo a la riolita existe una andesita con estructura lajeada. En conjunto, constituyen relieves de 3,000 m s.n.m. El relieve de estas rocas está muy fracturado y afectado por fallas normales. Por correlación litológica y mineralógica,

Ledezma-Guerrero (1987) le asignó la misma edad del Grupo Pachuca, Oligoceno-Mioceno.

Formación Chignahuapan (Tpch). Es una secuencia de derrames de hialotraquita y riolita, que afloran al NE de la zona, ambas tienen textura fluidal. Como minerales esenciales de la primera existe sanidino, oligoclasa y cuarzo, también contiene hematita y goetita; la riolita presenta lentes de obsidiana.

El relieve formado por estas rocas está afectado por numerosas fracturas y por fallas normales de dirección NW-SE. Esta unidad sobryace a la Andesita el Peñón, su espesor conocido es de 250m y su edad estimada es del Plioceno.

Terciario no diferenciado (Tpv). Son rocas de composición variable que afloran en diferentes parte del área. Petrográficamente, se trata de andesitas, basaltos, latitas, riolitas y tobas. En la sierra de Apan, son basaltos y andesitas de hiperstena y hornblenda; al sur de Calpulalpan, son andesitas típicas y dacitas que constituyen parte de la sierra de Río Frío, con elevaciones de 4,000 m s.n.m., mientras que al oeste predominan las latitas y traquitas. Estas rocas subyacen a la Formación Calpulalpan y, en forma discordante, a los derrames cuaternarios. Mooser (1975) asignó estas rocas al Plioceno.

Formación Calpulalpan (Tpc). Constituida por clásticos andesíticos cuyos fragmentos varían de limos a conglomerado. En la cima presenta toba, pómez y depósitos fluviales indicando paleocanales. En la base presenta alternancia de limos, arenas, gravas y bloques de rocas andesíticas y dacíticas y horizontes de pómez. En el norte y oriente del área, esta unidad está constituida principalmente por tobas, cenizas y arenas. A estos sedimentos que forman el piedemonte, Ledezma-Guerrero (1987) les asigna un espesor de 300 m, y considerando cierta similitud litológica con la Formación Tarango, definida por Bryan (1948), indica una edad pliocénico-pleistocénica.

SISTEMA CUATERNARIO

Comprende derrames de basalto y andesita basáltica. Ledezma-Guerrero (1987) los incluye bajo el nombre de Basalto de olivino (Qb). Estas rocas constituyen relieves alargados o, bien, volcanes individuales; las lavas son masivas, en bloque o derrames de tipo malpaís, y se extienden en la planicie, donde se interdigitan con los sedimentos fluviales.

Aluvión (Qal, Qil, Qlac). Constituido por depósitos fluviales y lacustres y material piroclástico, cuya textura varía de arcilla a conglomerado; la interpretación de los sondeos eléctricos verticales efectuados por la CAVM, en 1983, y los realizados durante este estudio, permitió definir en forma general la disposición de estos sedimentos. Las figuras 3 y 4 muestran que el relleno alcanza un espesor promedio 400 m, que en su mayor parte consta de arenas, gravas y brecha volcánica; asimismo, existen delgados horizontes de arcilla a diferentes profundidades.

En toda la superficie de la planicie existen sedimentos limoso-arcillosos, a 2 m de profundidad destaca un horizonte de arcilla bastante fisurada de 2 m de espesor.

En la parte occidental existen 15 m de sedimentos lacustres limoso-arcillosos, que sobryacen a arenas y gravas y roca volcánica. En la zona del lago Tóchac, se tiene unos 40 m de depósito lacustre sobryaciendo a arenas, gravas y conglomerados; a 250 m de profundidad se interpreta un paquete arcilloso de 100 m de espesor limitado lateralmente por roca volcánica.

MARCO ESTRUCTURAL

Las principales estructuras de esta subcuenca son los relieves volcánicos, cuya disposición expresa tres sistemas de fracturas: NE-SW, NW-SE, y E-W, a través de los cuales se dio la mayor actividad volcánica.

La disposición del relieve muestra un exvalle de dirección NW-SE, que se extiende desde del pueblo de Irolo hasta el de Apizaco. Este valle, superficialmente, quedó dividido en tres subcuencas cerradas, formadas durante las últimas erupciones volcánicas de los cerros de Apan, en el oeste, y las del cerro Tezoyo, en el este; sin embargo, en el subsuelo es todavía de manera parcial un solo valle; asimismo, el parteaguas superficial en el lado meridional de estos cerros es apenas notable. El relieve más antiguo tiene correspondencia con las fracturas NE-SW (Blázquez, 1956; Mooser, 1975), y las fracturas NW-SE y NE-SW se asocian con la existencia de pilares tectónicos, orientados en esa dirección, que delimitan depresiones tectónicas, como en el caso de Tecocomulco (Marín-Córdoba *et al.*, 1990).

La falla Tláloc-Telapón, de orientación SW-NE, afecta los cerros de Apan y se prolonga hacia Tecocomulco, esto hace pensar que la fosa? de Tecocomulco se prolonga en la parte oeste de la subcuenca en cuestión. En los sedimentos de la Formación Calpulalpan esta falla es menos visible. Asimismo, existen muchas otras fallas normales y fracturas que afectan el relieve de esta zona, cuya disposición corresponde a las direcciones antes dichas.

Los grandes espesores del relleno, aquí estimados en 400 m, que probablemente sean mayores, pueden ser la respuesta a la presencia de pequeñas fosas tectónicas rellenadas.

HIDROGEOLOGÍA

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

La precipitación media anual, calculada mediante los métodos de isoyetas y Thiessen, es de 658 mm; espacialmente, varía de 500 mm en la planicie a 900 mm en la montaña. La distribución de la lluvia durante el año define tres periodos: (a) húmedo, de junio a septiembre, con el 66% de la lluvia anual; (b) seco, de noviembre a marzo, con el 24% del total de lluvia; y (c) transicional, en los meses de abril, mayo y octubre, con el 10% restante del total de la lluvia anual (Figura 5). La temperatura media mensual oscila de 10°C a 16°C.

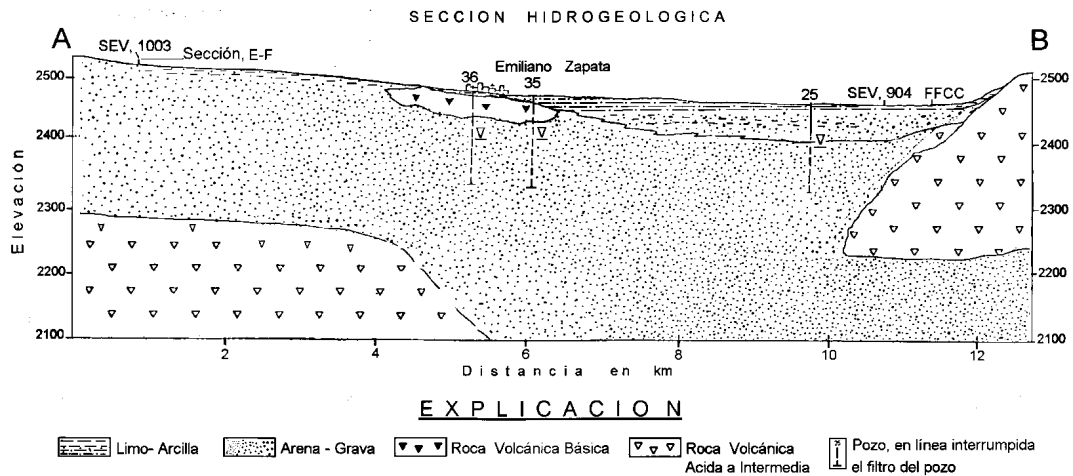


Figura 3. Sección hidrogeológica A-B en la subcuenca de Apan; su ubicación se muestra en la Figura 2.

La evapotranspiración real obtenida, tiene un promedio anual de 568 mm, que representa el 84% de la lluvia de esta subcuenca.

El escurrimiento superficial es de tipo torrencial y se presenta de junio a octubre, durante el resto del año varios de los cauces llevan agua residual, algunos descargan en lagunas de oxidación, otros la pierden por infiltración y evaporación, y otra parte es utilizada para riego en las inmediaciones de Irolo. El escurrimiento medio anual calculado con datos hidrométricos es de 6'485,331 m³/año; este valor indica que el 95% de la lluvia de esta zona lo consumen la evapotranspiración y la infiltración.

El escurrimiento superficial correspondiente al drenaje de los manantiales es de 1'115,394 m³/año, del cual el 30% fluye hacia la planicie, donde se infiltra, y el resto es aprovechado para consumo humano.

AGUAS SUBTERRÁNEAS

El cuadro estratigráfico y estructural antes descrito permite reconocer los siguientes tres tipos de acuíferos: (A) intergranular, (B) fisurado y (C) mixto, cuyas características geométri-

cas, funcionamiento hidrogeológico y parámetros hidráulicos se describen en seguida (ver carta hidrogeológica [Lámina 1]). Las unidades hidrogeológicas que los constituyen tienen entre sí conexión hidráulica, por lo que forman un sistema acuífero.

A. Acuífero Intergranular

Constituido por los sedimentos clásticos y volcánoclasticos que integran la planicie. Con base en su productividad determinada mediante el gasto de los pozos, este acuífero se subdivide en dos subunidades: una de productividad alta y otra de productividad baja.

a. Extenso de productividad relativamente alta. Corresponde a los sedimentos de la planicie cuyo espesor es superior a 200 m. Las secciones hidrogeológicas (Figuras 3 y 4), muestran una mayor heterogeneidad de la sedimentación hacia las orillas de la planicie, caracterizada por repeticiones de horizontes aluviales y piroclásticos, principalmente tobas, brechas y gravas, mientras que hacia el centro de la planicie se observa más homogeneidad predominando las arenas, limos y arcillas que sobreyacen a rocas volcánicas.

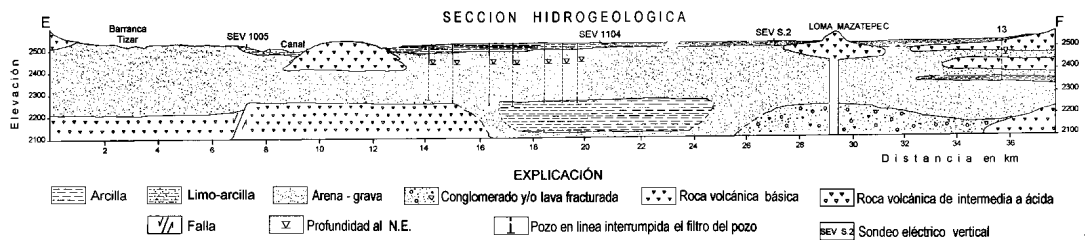


Figura 4. Sección hidrogeológica E-F, en la subcuenca de Tóchac; su ubicación se muestra en la Figura 2.

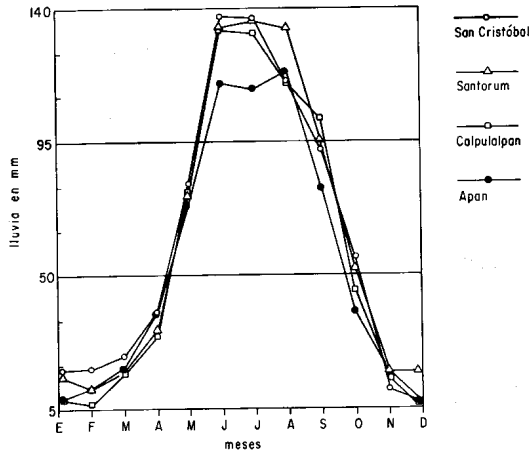


Figura 5. Concentración de la lluvia media mensual por estación en la subcuenca de Apan-Tóchac.

En estos materiales se aloja el acuífero libre de gran espesor. En algunos lugares, como en la Laguna de Apan, la zona del Lago Tóchac y sus inmediaciones, la existencia de sedimentos lacustres con espesor promedio de 30 m determinan condiciones semiconfinadas de este acuífero

Geometría y límites. El acuífero está delimitado al norte por relieve volcánico afectado por fracturas y fallas con orientación NW-SE. En el sur, existe un relieve menos tectonizado e integrado por una alternancia de sedimentos clásticos, cubriendo rocas volcánicas. De oeste a este, por la información de las figuras 3 y 4 y por los datos de campo, se puede decir que en el subsuelo es un sólo acuífero desde Cd. Sahagún hasta Apizaco, fuera del área de estudio, cuya planicie está dividida en la superficie por un parteaguas apenas perceptible.

La falla Tláloc-Telapón cruza el área en dirección NE-SW, y pareciera dividir en dos al acuífero; sin embargo, dicha

falla está cubierta por sedimentos terciarios y cuaternarios que hacen posible el flujo de agua subterránea desde Tóchac hacia Irolo, principalmente al norte y sur de esos cerros.

Funcionamiento hidráulico. El nivel del agua alcanza 135 m de profundidad en la periferia sur de la planicie y 60 m hacia el centro de ella, lo que determina gradientes hidráulicos entre 0.01% y 0.008% y, una gruesa zona no saturada. La composición litológica de esta zona, los valores de evapotranspiración obtenidos y la distancia a la zona saturada, permiten inferir que, en gran parte de la planicie, la recarga vertical es en forma lenta y en pequeño volumen.

La distribución del bombeo en la planicie, influye en el flujo del agua subterránea que es de este a oeste, interrumpiéndose hacia los pozos de mayor bombeo, donde la configuración de las isopiezas muestra descensos locales. El trazo de las isopiezas permite decir, una vez más, que este acuífero se extiende desde Apizaco hasta Irolo y que, posiblemente, por el NW existe conexión hidráulica con el valle de Tecocomulco. Por su posición topográfica y su naturaleza litológica, este acuífero es la zona receptora del flujo subterráneo que fluye desde el área de recarga, y lo define como el área de descarga la cual se hace a través del bombeo de pozos

La variación del nivel del agua se obtuvo con datos registrados por la CAVM, durante el período 1973-1988, y con mediciones realizadas en este trabajo. En ambos casos, se observan evoluciones puntuales de 0.70 cm, en pozos donde la extracción es pequeña; no obstante, en general la evolución del nivel de agua muestra una tendencia negativa de 0.40 cm/año.

Parámetros hidráulicos. En esta unidad, existen 95 pozos para agua, cuya profundidad varía entre 60 y 250 m, y únicamente del 8% se conocen las propiedades hidráulicas del acuífero. Los datos obtenidos muestran para la transmisividad valores que oscilan entre 500 y 2,700 m²/día, estando la mayoría comprendidos entre 500 y 1,500 m²/día. Las zonas de mayor transmisividad obtenida son la zona de E. Zapata, con 2,500 m²/día; Apan, con 2,700 m²/día; y Francisco Villa, con 1,600 m²/día (Figura 6).

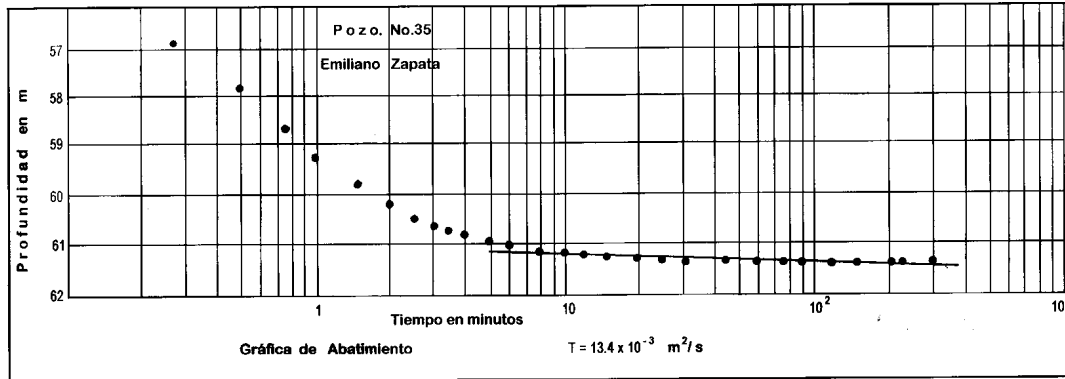


Figura 6. Gráfica de prueba de bombeo en la zona de Apan, Pozo Emiliano Zapata.

El coeficiente de almacenamiento en estos sitios varía entre 15 y 40%. Se debe decir que, en toda la zona, únicamente los pozos de los poblados E. Zapata, Calpulalpan y Apan, y los pozos destinados para riego, tienen diámetros de descarga similares y largos periodos de bombeo: 22/22 hrs, los primeros y 7 hrs los segundos. En los pozos restantes, el diámetro y el periodo de bombeo son pequeños. Por esta razón, no se puede lograr una regionalización de los parámetros del acuífero, pues los volúmenes de extracción y tiempo de bombeo son muy desiguales. Sin embargo, el marco geológico descrito y las observaciones puntuales del bombeo, permiten regionalizar dichos parámetros en este acuífero.

Los parámetros antes citados se obtuvieron con pruebas de bombeo realizadas sin pozos de observación, a caudal constante y con periodos de bombeo largo. La interpretación se hizo combinando las técnicas de:

Cooper-Jacob (1946): $T = 2.3 Q / 4 \pi s$ $S = 2.25 T t_0 / r^2$
y Girinski in Castany (1971): $K = (0.366 Q/L s) \log (1.6 L/r)$

donde Q es el gasto del pozo en l/s, L es la longitud de la parte activa del pozo, s es el abatimiento, r el radio del pozo y t_0 es el tiempo inicial para el cual el abatimiento es cero.

Respecto a los caudales de descarga, de los 95 pozos censados, aproximadamente 60 operan diariamente con horario y caudales variables. Estos últimos oscilan entre 0.100 y 0.006 m^3s^{-1} y constituyen la principal descarga. También, se supone una descarga lateral, hacia Irolo, de 0.150 m^3s^{-1} . Los numerosos pozos extraen aproximadamente 0.348 m^3s^{-1} .

b. De productividad local. Corresponde a los angostos valles, situados al pie de la montaña, constituidos por aluvión, que se alternan con productos piroclásticos y con roca volcánica. Sus relaciones de flujo con las rocas volcánicas son de drenaje constante y en forma semipermeable con los depósitos piroclásticos. Los parámetros hidráulicos de esta parte del aluvión sólo se estimaron, pues no fue posible obtener valores del acuífero. Entonces, a partir de los gastos de los pozos, se piensa que su transmisividad pueda ser de $10^{-4} m^3 s^{-1}$. La descarga observada en esta zona, conocida por el bombeo, es de 0.52 $m^3 s^{-1}$.

B. Fisurado

En las rocas volcánicas que constituyen el relieve de esta subcuenca y que en la planicie se interdigitan con los sedimentos clásticos, las rocas volcánicas constituyen una gran unidad hidrogeológica, misma que por su fracturamiento y por su productividad se puede dividir en dos subunidades.

a. De productividad local y/o discontinua. Comprende, al sur, las rocas andesíticas parcialmente cubiertas por derrames de lava y piroclastos cuaternarios; en la parte septentrional, este acuífero está constituido por una alternancia de derrames de ba-

salto y andesita con materiales piroclásticos; hacia el NE se forma por riolita y andesitas muy fracturadas.

Geometría. La geometría de este acuífero se circunscribe desde la parte alta de la montaña hasta sus interdigitaciones con los sedimentos en el interior de la planicie.

Funcionamiento. Por sus características topográficas y litoestructurales, en este acuífero el agua circula a través de fracturas o entre derrames de lava. En algunos sitios, parte del flujo, al llegar al los sedimentos piroclásticos, forma manantiales descendentes y/o continúa hacia mayor profundidad hasta la zona saturada situada a una profundidad promedio de 50 m, respecto al nivel de la planicie. En el primer caso, en la parte septentrional de la zona, a 2,550 msnm, en el contacto entre lavas y material piroclástico existen manantiales (ver carta hidrogeológica [Lámina 1]) indicando la existencia de un horizonte semipermeable a esa elevación. El agua de esas surgencias es parcialmente utilizada y el resto vuelve a infiltrarse antes de llegar a la planicie. Lo antes expuesto muestra el comportamiento de este acuífero como área de recarga.

Parámetros hidráulicos. Los valores obtenidos en dos de los pozos que explotan esta unidad son: transmisividad $11 \times 10^{-2} m^2 s^{-1}$ y $3 \times 10^{-3} ms^{-1}$ de permeabilidad. Respecto a los gastos promedio de los manantiales, varían entre 1 y 11 Ls^{-1} ; se estima que el resto de la unidad pueda tener permeabilidad de baja a media (Figura 7). Los gastos de los manantiales y el bombeo de pozos logran una descarga de 0.151 m^3s^{-1} .

b. De productividad pequeña para ser aprovechada. Comprende rocas terciarias no diferenciadas y rocas más recientes cuyos derrames son masivos, en los cuales únicamente se identifica una permeabilidad secundaria, distribuidos en toda el área, principalmente hacia el oeste del poblado Emiliano Zapata. Su baja permeabilidad y la escasa vegetación favorecen el escurrimiento superficial, mismo que se infiltra al llegar a la planicie. No obstante su baja permeabilidad, esta unidad es parte del área de recarga.

C. Mixto (en rocas granulares o fisuradas)

También subdividido en dos subtipos con base en su productividad.

a. De productividad local limitada. Caracterizado por una alternancia de sedimentos fluviales, tobas y rocas fisuradas, dispuestas en la parte baja del relieve volcánico, estos materiales, cuyo espesor posible es de 300 m, hacen posible la disposición de agua en pequeños volúmenes que alimentan varios pozos perforados en esta unidad.

Geometría. Esta unidad es un paquete de forma tabular cuyo espesor es mayor hacia la parte baja de la montaña; las tobas cons-

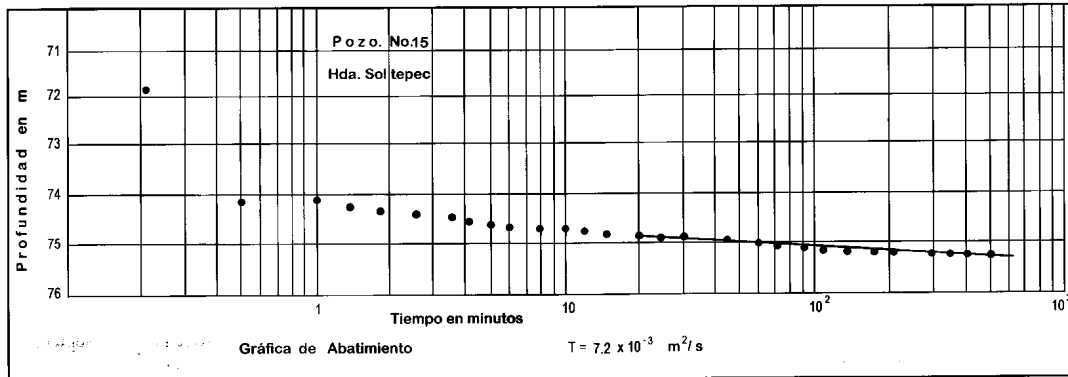


Figura 7. Gráfica de prueba de bombeo en la zona de Tóchac, Pozo Hacienda Soltepec.

tienen horizontes semipermeables dispuestos en forma indistinta, sus relaciones hidráulicas con las unidades, fisurado e intergranular son de tipo constante.

Funcionamiento hidráulico. En esta unidad, la profundidad del nivel del agua, en promedio, es de 115 m. El gradiente hidráulico del mismo descende hacia la planicie, indicando que esta unidad funge también como zona de recarga.

En los pequeños valles intramontanos, donde existe una delgada cubierta de depósito aluvial, toba y ceniza volcánica que puede almacenar muy pequeños volúmenes de agua, frecuentemente existen pequeñas surgencias (áreas de drenaje subsuperficial) que hacen posible que existan cuerpos de agua superficial, de los cuales se abastece la población rural.

Parámetros hidráulicos. A pesar de existir pozos en esta unidad, no fue todavía posible obtener valores de los parámetros, pero con apoyo en los caudales de bombeo y en las descargas de manantiales en esta zona, se infiere una permeabilidad de 2×10^{-4} , 10^{-5} ms^{-1} . Respecto a la descarga, el bombeo a que está sujeta esta unidad, y las descargas de surgencias dan en conjunto un valor anual de $0.072 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

b. Depósitos piroclásticos semipermeables que cubren un acuífero intergranular o fisurado, de productividad variable. Se relacionan con materiales limoarenosos, tobas arcillosas semicompactas, y abundancia de horizontes de caliche. La ausencia de agua en estos materiales permite inferirles una permeabilidad muy baja: 2×10^{-6} , 10^{-8} ms^{-1} . La disponibilidad de agua en ellos es pequeña y la drenan hacia los acuíferos adyacentes.

Límites. En la parte septentrional, estos sedimentos sub- y sobreyacen a rocas fisuradas o intergranulares de mayor permeabilidad que, en el primer caso, determinan la presencia de manantiales y, en el segundo, se comportan como una capa de circulación lenta hacia los acuíferos intergranulares o fisurados;

esta última situación es la predominante en el lado sudoriental de la subcuenca.

Calidad del agua subterránea. Para este aspecto se realizaron 225 análisis fisicoquímicos de agua subterránea. La confiabilidad de los análisis se evaluó mediante la fórmula del balance iónico, aceptando los análisis cuyo error fue menor que 10%. De los resultados se tiene:

La temperatura del agua subterránea tiene variaciones en correspondencia con la temperatura del medio ambiente, excepto en los pozos donde el nivel del agua es menor que 100 m de profundidad, cuando es superada en 4°C , lo que se atribuye al efecto del gradiente térmico; pues la mineralización del agua no manifiesta otra posible fuente de calor.

La temperatura promedio anual en los manantiales es de 10°C y de 20°C en los pozos; en estos últimos, el rango es de 18°C a 24°C , que, según la clasificación de Bogomolov, in Custodio y Llamas (1983), corresponde a un agua tibia.

La conductividad eléctrica oscila de 50 a $610 \mu\text{S}/\text{cm}$, los valores menores que $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ pertenecen a los sitios ubicados en la zona de recarga, y los valores mayores que $250 \mu\text{S}/\text{cm}$ pertenecen a los sitios de la planicie. En la planicie, los valores de este parámetro son semejantes; no obstante, se aprecian sitios individuales con mayor C.E. (Figura 8). Las cantidades de C.E. detectadas, se reflejan en el bajo grado de mineralización del agua de esta zona. En igual forma, indican una marcada lixiviación de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ y los aniones HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} hacia las zonas bajas, donde, según Richardson y McSween (1989), las sales más comunes formadas pueden ser: CaHCO_3^+ , MgHCO_3^+ , NaHCO_3 , NaCl , KSO_4^- y NaSO_4^- .

Los cationes presentes, en orden decreciente, son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ , mientras que los aniones más abundantes, en el mismo orden, son: HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} .

Respecto a los sólidos totales (S.T.), los valores varían entre 100 y 480 ppm/l, a excepción de la muestra 52, que corresponde al agua residual y, cuyo valor es $> 600 \text{ ppm/l}$; natural-

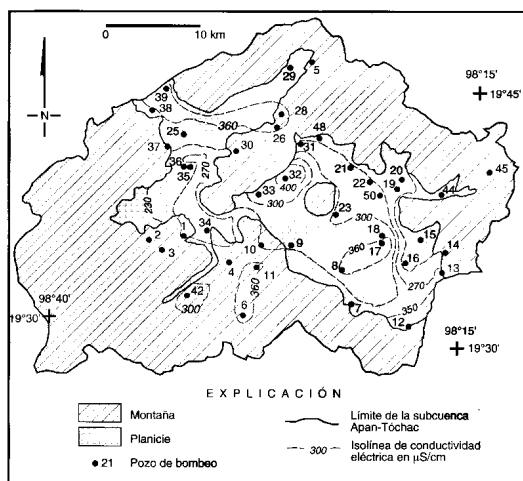


Figura 8. Distribución de la conductividad eléctrica en la subcuenca de Apan-Tóchac.

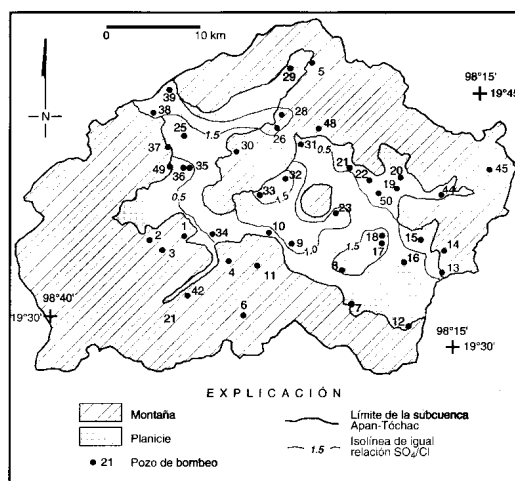


Figura 9. Variación espacial del índice hidroquímico SO_4/Cl , en la subcuenca de Apan-Tóchac.

mente, la distribución espacial de los S.T. se correlaciona con la distribución de la conductividad eléctrica y ambos parámetros indican una baja mineralización del agua en esta subcuenca.

La interpretación de la información precedente y de los índices geoquímicos, manifiesta que la principal dirección del flujo subterráneo es de E-W, y que los valores bajos de la mineralización corresponden a los sitios que pertenecen a la zona de recarga. Así, mientras que el índice Cl/HCO_3 disminuye hacia la planicie, la relación $(SO_4+HCO_3)/Cl$ aumenta, indicando, así, el flujo subterráneo y la degradación del agua en esa dirección.

La relación SO_4/Cl se incrementa hacia la planicie, indicando la dirección de la mineralización del agua. Existen pozos donde esta relación supera la unidad y, de acuerdo con Freeze y Cherry (1979) y Custodio y Llamas (1983), estos valores indican contaminación, corroborable en campo, pues los pozos no tienen contra-ademe de protección que evite la filtración de agua hacia los pozos (Figura 9).

Representando los resultados de los análisis químicos en los diagramas de Schoeller (1955) y Piper-Hill (1944) (Figuras 10 y 11), se presenta la facies hidroquímica bicarbonatada cálcica/magnésica: $rHCO > rCl > rSO_4$; $rCa > rMg > rNa$; $rCa < rMg > rNa$, que presenta tendencias temporales hacia las facies bicarbonatada sodico/cálcica y clorurada cálcica magnésica. La facies de agua obtenida corresponde a la de un ambiente volcánico de composición básica a intermedia en donde, de acuerdo con Appelo y Postma (1993), Freeze y Cherry (1979) y Owen y colaboradores (1995), el calcio y el magnesio provienen de las plagioclasas. Los valores de los índices Mg/Ca y Na/Cl fortalecen esta idea; además, ponen de manifiesto un cambio de bases muy activo, semejante al descrito en la zona de Chalco por Huízar-Álvarez (1989), en el que el calcio y el magnesio se reflejan

en la dureza del agua y determinan un valor máximo de 2.16 ppm.

La figura 10 representa las diferentes facies hidroquímicas antes mencionadas. Se observa en las muestras 11 y 29, una reducción de SO_4^{2-} y un aumento paralelo de HCO_3 . Esto indica que no existe precipitación de $CaCO_3$. En las muestras 16 y 17, el agua evoluciona hacia condiciones más salinas; asimismo, el incremento de SO_4^{2-} y NO_3^- en los pozos 16, 17 y 33, permite decir que en ellos existe contaminación antrópica.

La gráfica del pozo 45 muestra las características hidroquímicas del agua de la zona de recarga de esta región, los contenidos de sulfatos y cloruros corresponden a los aportados por la lluvia.

Con base en la clasificación del índice RAS, el 60% de los pozos está caracterizado por tener un agua de clase C2S2; (agua media en salinidad—media en sodio). Esta clase de agua es peligrosa para irrigación en suelos con deficiencias de drenaje. El resto de los pozos tienen agua aceptable para riego.

Respecto a los elementos traza, éstos presentan concentraciones que varían de un pozo a otro y se detectaron en el siguiente orden decreciente: $Fe > Pb > Ni > Co > Mn > Zn > Cu > Cr$ (Tabla 1). De acuerdo con las normas de la SS (1996) y WHO (1984), las concentraciones de Pb para todos los pozos rebasan por el doble esas normas; los demás elementos son todavía admisibles para consumo humano. Sin embargo, la presencia de Fe, Ni, Mn y, sobre todo, Cr (Tabla 1) en concentraciones significativas en la mayoría de los pozos, indican la influencia antrópica en el agua subterránea del área y la inminente necesidad de protección. No obstante, lo antes expuesto, se puede decir que el agua de esta zona es aún de buena calidad.

Inventario del recurso agua subterránea. Uno de los problemas todavía presentes en hidrogeología es la correcta evaluación del

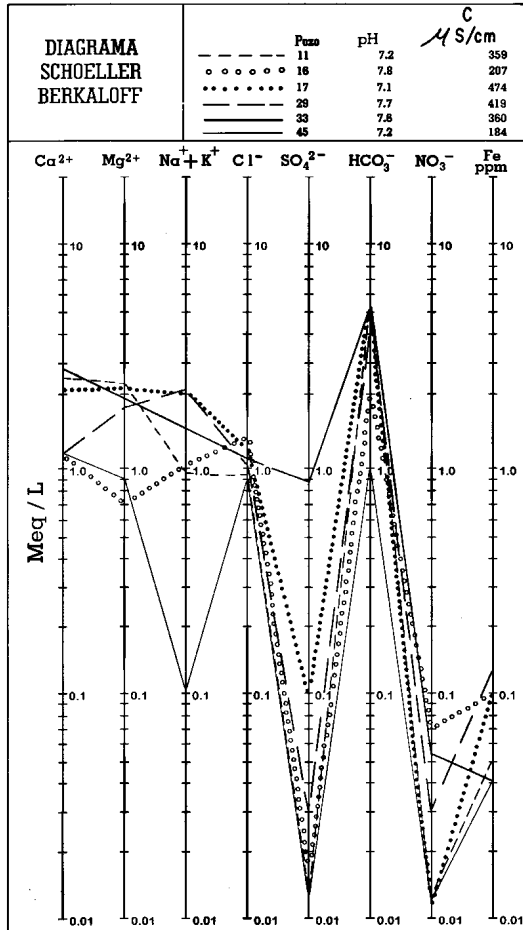


Figura 10. Representación de los resultados de los análisis fisicoquímicos y facies hidroquímicas de la subcuenca de Apan-Tóchac en el diagrama Schoeller-Berkaloff.

balance hidrogeológico pues, parte de la información necesaria para lograrlo (profundidad de los pozos, volumen de extracción diaria por pozo, vigilancia permanente de niveles del agua en pozos, entre otros) es y debe ser generado por oficinas de gobierno. Por ejemplo, el volumen de extracción diaria por pozo, pocas veces es bien conocido, no existe control de las descargas residuales y pluviales. Por ello es importante cuantificar y separar el escurrimiento superficial correspondiente a manantiales, a la lluvia y al agua residual, así como los volúmenes reutilizados, pues en esta zona el porcentaje de infiltración de agua residual, aunque variable, es muy importante. Por estas razones, el balance aquí expuesto es preliminar.

Los valores obtenidos para cuantificar el agua subterránea de esta zona son los siguientes:

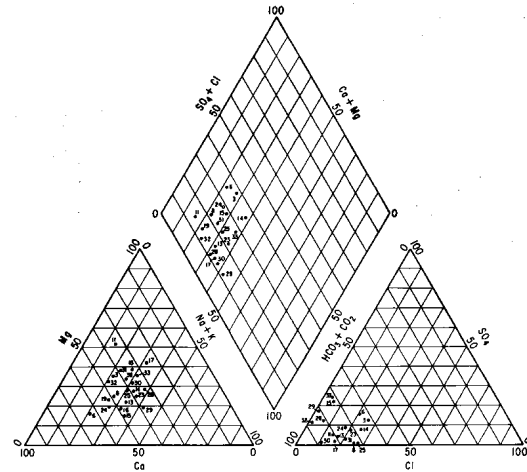


Figura 11. Representación de los resultados de los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua subterránea en diagramas de Piper-Hill.

Entradas (Ri) (10 ⁶ m ³ /año)		Salidas (Qi) (10 ⁶ m ³ /año)	
Lluvia efectiva (b)	258.7	Evapotranspiración (b)	221.6
Infil. de agua de riego.(b)	1.1	Escurrimiento superficial (a)	6.5
Escurrimiento superficial (b)	0.8	Bombeo (b)	25.4
		Manantiales (b)	1.2
		Salida lateral (c)	4.7
Total	260.6	Total	259.4

Diferencia Ri - Qi = 1.2 x 10⁶ m³/año

- (a) Información obtenida de la SARH.
- (b) Cálculos del censo realizado en este trabajo.
- (c) Dato estimado para el balance. El porcentaje de infiltración producto del agua de riego se estimó en un 30%, muy similar a los valores indicados (Bife *et al.*, 1972) para zonas semisecas, como la presente.

Directrices de acción en relación con el uso y la calidad del agua subterránea

Los principales usos del agua en esta región son el doméstico y el agrícola-ganadero. El agua residual se vierte sin tratamiento previo en los arroyos y fluye hacia lagunas de oxidación. Por las características geológicas locales, tanto en los cauces como en las lagunas, el agua residual se evapora y se infiltra, implicando un fuerte potencial contaminante del agua subterránea de esta zona.

El agua residual de las ciudades de Apan, Calpulalpan, E. Zapata y poblados locales es empleada al SE de Irolo para irrigar unas 50 ha. En diferentes sitios de la subcuenca, se irriga con agua de pozos, la superficie de riego es de aproximadamente 170 ha y tanto en la zonas de riego como en las de temporal es común la aplicación de productos agroquímicos.

En este estudio no fueron analizados los posibles contenidos de compuestos orgánicos en el agua subterránea, pero no se

Tabla 1. Resultados de los análisis físico-químicos de muestras de agua de pozos y manantiales en la subcuenca de Apan-Tóchac.

SITIO Núm.	Temp. °C	pH	C.E. µS/cm	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	S.D.
1	24.5	7.5	274	25.6	20.1	19.4	8.9	179.2	29.4	0.9	2.3	294
2	25.0	7.8	195	22.5	12.9	15.2	5.8	139.1	23.5	2.3	0.3	243
3	25.7	7.8	205	22.0	14.6	15.0	5.7	137.6	26.5	2.2	0.6	209
4	20.3	7.7	244	21.5	18.2	17.4	7.0	148.3	25.0	0.4	0.7	294
5	20.0	7.7	159	17.4	10.5	10.9	5.3	121.0	11.5	0.6	0.6	190
6	16.1	7.6	403	45.1	19.1	23.3	10.8	229.1	44.3	7.4	0.1	319
7	18.0	7.8	323	36.6	17.9	22.4	8.9	220.7	25.6	0.5	0.9	329
8	19.6	7.6	371	39.1	24.6	26.1	13.8	251.6	32.9	1.3	0.4	371
9	24.0	7.7	308	38.9	12.8	22.3	9.4	202.3	32.3	1.8	0.6	389
10	23.0	7.8	313	33.1	17.0	22.7	8.6	198.3	41.5	31.5	0.0	336
11	24.0	7.4	207	43.1	30.9	18.6	7.7	326.8	30.9	1.3	0.2	241
12	22.5	8.0	374	39.1	22.5	28.9	9.3	283.1	29.2	0.7	0.3	293
13	17.8	7.9	359	27.8	16.7	27.5	8.2	175.1	31.9	2.8	3.3	264
14	21.5	8.1	238	28.6	11.6	26.0	7.4	170.8	32.1	0.6	0.6	278
15	19.0	8.1	219	25.1	18.7	20.8	6.0	162.7	31.1	1.5	0.5	264
16	20.0	7.8	436	27.0	15.0	17.6	7.3	154.8	32.6	1.4	0.3	272
17	17.8	7.6	474	42.1	26.7	38.6	18.1	362.8	39.4	4.8	0.1	410
18	19.3	7.8	348	29.8	18.8	30.7	15.8	245.6	33.8	1.4	0.9	335
19	19.5	7.4	238	31.1	15.8	20.4	6.8	162.4	23.7	1.0	1.0	295
20	21.3	7.6	325	37.4	16.7	19.3	14.1	156.0	14.1	36.2	1.5	310
21	21.8	7.7	311	31.3	18.6	27.7	9.7	193.2	29.4	5.1	0.5	371
22	20.3	7.7	273	27.6	16.4	22.8	9.1	173.1	27.1	22.1	0.8	220
23	22.0	7.8	266	28.1	15.8	21.6	11.0	166.0	25.5	0.7	0.3	242
24	20.7	7.4	333	36.8	20.4	21.6	9.8	238.7	33.4	0.4	0.5	361
25	21.0	7.7	331	37.1	18.8	26.1	9.6	244.9	27.6	0.4	0.1	313
26	22.0	7.7	373	37.1	18.6	32.9	10.7	220.0	35.3	0.4	2.3	390
27	22.0	7.9	363	33.6	17.2	32.4	10.1	192.2	35.9	16.8	0.0	318
28	21.0	7.9	375	38.6	16.9	36.4	10.7	249.1	30.0	8.9	1.9	397
29	20.6	7.8	419	39.8	18.1	43.9	10.8	277.7	38.3	6.9	2.0	402
30	23.3	7.8	294	30.5	16.1	26.1	7.5	176.1	33.3	0.7	1.8	346
31	20.7	7.6	281	31.1	14.9	24.0	8.7	211.2	32.9	0.9	0.8	319
32	19.2	7.6	549	48.1	24.9	35.3	16.1	262.4	34.3	37.4	4.8	456
33	23.7	7.7	360	39.2	23.3	31.9	11.8	248.0	35.9	23.7	1.5	419
34	19.5	7.6	273	30.9	18.8	19.1	7.5	213.1	35.8	0.4	1.2	288
35	19.8	7.8	280	29.1	15.8	22.1	7.5	200.7	23.5	25.3	0.9	183
36	19.3	7.8	201	27.8	14.0	20.3	6.1	155.1	26.4	2.4	0.7	274
37	23.8	7.7	341	36.1	19.5	22.9	8.9	233.8	34.0	0.9	0.6	352
38	21.4	7.9	356	39.8	19.3	25.1	8.2	259.1	27.7	1.2	0.5	397
39	18.3	7.9	332	34.1	18.3	28.3	10.2	235.0	25.8	11.7	0.6	348
40	21.5	8.1	347	32.1	19.5	27.7	8.9	210.0	33.9	5.3	0.6	345
41	24.3	8.1	334	35.1	16.7	29.0	9.0	225.4	31.1	0.3	0.7	261
42	16.0	7.0	329	34.1	23.0	22.0	11.2	255.1	33.5	2.8	0.0	479
44	16.8	7.7	248	32.3	10.5	18.5	6.6	159.8	25.7	2.3	1.1	307
45	10.3	7.2	184	22.7	7.3	2.6	1.1	45.7	23.6	7.8	0.0	65
48	26.0	8.1	363	38.7	17.0	57.6	8.3	235.9	47.9	9.6	2.1	240
49	24.0	7.7	291	35.1	19.1	24.4	8.8	226.0	36.2	5.3	0.2	374
50	18.0	7.4	280	32.9	13.1	23.8	7.7	156.7	39.7	33.9	0.4	281
52	17.0	7.2	605	38.1	17.6	31.6	21.7	290.7	62.1	3.7	0.7	671

C.E.: conductividad eléctrica
S.D.: sólidos disueltos

descarta su presencia en ella, pues el empleo de productos agroquímicos en la zona es muy antiguo. Respecto a contaminación inorgánica y biológica, en varios pozos los contenidos de elementos traza como Pb, Fe, Mn y Cr, son significativos y los contenidos de mesófilos y coliformes en la mayoría de los pozos supera la norma de la SS (1996). Esto hace necesario la cloración del agua.

El riesgo de sodicidad del suelo es aún pequeño, mientras que la salinidad es de tipo medio, por lo que es necesario realizar estudios detallados de suelos y dar alternativas dirigidas a detener y reducir tales riegos.

La contaminación inorgánica del agua subterránea de esta zona aún es pequeña. La posible explicación de ello es, por un lado, la presencia en la parte superior del relleno de la planicie, de materiales de permeabilidad media, y por otro lado, la acción fijadora del suelo, misma que se deberá comprobar a fu-

Tabla 1. Continuación.

SITIO Núm.	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Cr	Co	Ni
1	0.052	0.014	0.018	0.009	0.162	0.015	0.040	0.084
2	0.093	0.018	0.019	0.013	0.200	0.014	0.065	0.077
3	0.025	0.000	0.005	0.010	0.075	0.010	0.031	0.035
4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.700	0.011	0.020	0.040	0.100	0.005	0.001	0.032
6	0.042	0.009	0.023	0.054	0.100	0.011	0.030	0.080
7	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.037	0.009	0.008	0.017	0.110	0.019	0.032	0.101
9	0.107	0.024	0.024	0.012	0.163	0.013	0.040	0.083
11	0.052	0.014	0.008	0.017	0.131	0.015	0.044	0.053
13	0.130	0.023	0.023	0.023	0.188	0.011	0.013	0.065
14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.049	0.009	0.014	0.019	0.132	0.015	0.036	0.066
16	0.066	0.009	0.020	0.012	0.132	0.015	0.044	0.090
17	0.084	0.012	0.040	0.146	0.100	0.009	0.025	0.025
18	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.051	0.013	0.032	0.037	0.132	0.011	0.028	0.098
20	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	0.178	0.018	0.009	0.017	0.188	0.007	0.040	0.080
22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
24	0.115	0.013	0.021	0.018	0.110	0.015	0.074	0.066
25	0.100	0.017	0.012	0.051	0.146	0.023	0.039	0.631
26	0.069	0.009	0.016	0.020	0.132	0.015	0.032	0.072
27	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
28	0.066	0.019	0.014	0.018	0.162	0.015	0.032	0.044
29	0.077	0.012	0.016	0.030	0.138	0.011	0.040	0.088
30	0.060	0.023	0.029	0.031	0.142	0.019	0.083	0.060
31	0.079	0.023	0.020	0.011	0.138	0.018	0.065	0.094
32	0.088	0.012	0.019	0.053	0.138	0.023	0.028	0.130
33	0.063	0.015	0.021	0.035	0.170	0.017	0.067	0.130
34	0.044	0.039	0.023	0.021	0.170	0.024	0.085	0.080
36	0.044	0.023	0.013	0.011	0.215	0.019	0.043	0.058
37	0.040	0.000	0.010	0.020	0.150	0.010	0.090	0.000
38	0.065	0.019	0.013	0.019	0.192	0.015	0.042	0.060
39	0.049	0.019	0.014	0.013	0.152	0.013	0.024	0.060
40	0.069	0.023	0.014	0.026	0.183	0.018	0.053	0.113
42	3.566	0.009	0.188	0.008	0.165	0.018	0.043	0.098
44	0.046	0.023	0.023	0.036	0.165	0.018	0.070	0.083
45	0.055	0.012	0.024	0.070	0.138	0.013	0.065	0.085
48	0.360	0.010	0.004	0.019	0.019	0.002	0.007	0.002
49	0.039	0.023	0.017	0.096	0.138	0.013	0.060	0.105
50	0.120	0.015	0.017	0.011	0.150	0.017	0.025	0.075
52	5.848	0.012	0.249	0.042	0.188	0.018	0.058	0.088

turo, y la zona saturada, como ya se dijo, es profunda, por tanto, existe espacio y tiempo para que se realice una autodepuración; no obstante lo anterior, se requiere que los pueblos, por pequeños que sean, se preocupen e inicien el tratamiento del agua residual para reducir el potencial contaminante de este tipo de agua.

Es de importancia la realización de pozos piezométricos cercanos a los pozos de bombeo, así como un mejor equipamiento hidrogeológico de algunos pozos de bombeo, lo que hará posible vigilar el nivel del agua y también la obtención de parámetros hidráulicos puntuales en pozos y, con ello, tener una mayor densidad de datos para poder simular el sistema de flujo en la zona.

CONCLUSIONES

La información antes descrita permitió definir los siguientes acuíferos: (i) intergranular, (ii) fisurado y (iii) mixto. Los tres acuíferos tienen comunicación hidráulica entre sí. Los dos últimos se ubican en el área de recarga y corresponden a las rocas volcánicas y piroclásticas de la zona. El primero, constituye el área de descarga y está constituido por el relleno sedimentario de esta subcuenca, el cual se estima que tenga un espesor mayor que 500 m, dato obtenido en este estudio. Los valores de permeabilidad obtenidos son: 3×10^{-3} a 10^{-4} ms^{-1} para el intergranular, $5 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$ para el fisurado y para el mixto no se obtuvieron datos, pero considerando la litología que lo constituye, se le asignó un valor de $2 \times 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$.

La falla regional que cruza la subcuenca en dirección E-W, no afecta el funcionamiento hidrogeológico de la planicie, pero se supone que comunica la subcuenca de Apan con aquella de Tecocomulco.

Los valores pequeños de la mineralización del agua corresponden a la zona de recarga, y los valores más altos se asocian con la zona de descarga. Asimismo, en el interior de la planicie la mineralización del agua aumenta ligeramente en la dirección E-W, evidenciado de esta forma la dirección del flujo del agua subterránea.

Según la norma de la SS (1996) y de la WHO (1984), el agua de esta área aún es de buena calidad; no obstante, es preciso iniciar acciones para proteger los acuíferos, pues existen indicios significativos de elementos traza en el agua subterránea y la cloración del agua es deficiente.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su reconocimiento a las autoridades del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el apoyo logístico y financiero para esta investigación; a los Ing. E. Sahab, X. Aro, D. Arcos y de la Gerencia de Aguas del Valle de México, quienes facilitaron información hidrogeológica muy importante; a los M. en C. Teodoro Méndez-García y Kumiko Shimada, por los análisis químicos y bacteriológicos del agua, respectivamente; y al Sr. Luis Burgos-Peraita, por su apoyo en la cartografía. Asimismo, desea manifestar su profundo reconocimiento al Dr. Oscar Campos-Enríquez, por su apoyo en la interpretación de la información geofísica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APHA-WWA-WPCF, 1986, *Standard methods for the examination water and waste water*: Washington, D.C., American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Pollution Control Federation, 1300 p.
- Appelo, C.A.J., y Potsma, D., 1993, *Geochemistry groundwater and pollution*: Rotterdam, A.A. Balkema, 537 p.
- Bize, J.; Bourget, L.; y Lemoire, J., 1972, *L'alimentation artificielle des nappes souterraines*: Francia, Masson, 200 p.
- Blázquez, Luis, 1956, *Geohidrología de la cuenca de México*: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 77 p. (inédito).
- Bryan, Keith, 1948, Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México, en relación con los cambios climáticos: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, p. 1-20.
- Castany, G., 1971, *Tratado práctico de las aguas subterráneas*: Barcelona, Omega, 670 p.
- Cooper, H.H., y Jacob, C.E., 1946, A generalized graphic method for evaluating formation constants and summarizing well field history: *American Geophysical Union Transactions*, v. 27, p.526-534.
- Custodio, E., y Llamas, M., R., 1983, *Hidrología subterránea*: Barcelona, Omega, t. 1, p. 1003-1083; t. 2, p. 1784-2026 p.
- DETENAL, 1975, [Hoja] Ciudad Sahagún (E14-B12), Hidalgo: México D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Dirección de Estudios del Territorio Nacional, Carta geológica, escala 1:50,000.
- Freeze, R.A., y Cherry, J.A., 1979, *Groundwater*: Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 604 p.
- Fries, Carl, Jr., 1962, Hoja Pachuca 14Q-c(11), con Resumen de la hoja Pachuca, estados de Hidalgo y México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100 000, mapa con texto en el reverso.
- Geyne, A.R.; Fries, Carl, Jr.; Segerstrom, Kenneth; Black, R.F.; y Wilson, I.F., 1963, *Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca-Real del Monte, estado de Hidalgo: Consejo de Recursos Naturales no Renovables (México)*, Publicación 5E, 222 p.
- Huizar-Álvarez, Rafael, 1981, La geomorfología de la zona de Tepeji del Río, Hgo., México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras, Anuario de Geografía, Año XXI, p.11-45.
- 1989, Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la plaine de Chalco-Amecameca et de son bassin versant (Mexique): Francia, Université de Franche-Comté, tesis doctoral, 160 p. (inédita).
- Huizar-Álvarez, Rafael, y García, B., 1996, Disimetría de barranco en la subcuenca de Apan: *Sociedad Mexicana de Geomorfología, Reunión Nacional de Geomorfología*, 4a, Pátzcuaro, Michoacán, Memoria, p. 38-40.
- INEGI, 1983, [Hoja] Apan (E14-B22), Hidalgo, Tlaxcala y México: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta geológica, escala 1:50,000.
- 1985a, [Hoja] Mariano Arista (E14-B32), México, Puebla y Tlaxcala: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta geológica, escala 1:50,000.
- 1985b, [Hoja] Tlaxco (E14-B23), Tlaxcala: México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Carta geológica, escala 1:50,000.
- Ledezma-Guerrero, Odilón, 1987, Hoja Calpulalpan 14Q-h(3), con Resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, estados de México, Tlaxcala, Puebla e Hidalgo: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológica de México, Serie de 1:100,000, con texto explicativo que acompaña al mapa, 12 p.
- Marín-Córdoba, Salvador; Torres-Ruata, C.J.; y Lugo-Pérez, Fernando, 1990, Carta hidrogeológica de la República Mexicana, esc. 1:4'000,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Atlas Nacional de México, Naturaleza IV 6.3.
- Mooser, Federico, 1975, Historia geológica de la cuenca de México, in Memoria de las obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, t.1, p.7-38 y mapa geológico.
- Ortiz-Pérez, M.A., 1987, Los cambios de niveles de base como mecanismos morfogenéticos de la asimetría de valles: Universidad Nacional Autónoma de México, Boletín del Instituto de Geografía, núm.17, p. 9-44.
- Owen, P.B., y Blair, F.J., 1995, Main factors affecting the composition of natural waters, in Trace elements in natural waters: Ann Arbor, Ed. Brit. Salbu y Eiliv Steinnes, CRC Press, Boca Raton, Chapter 1, p.1-20
- Penman, 1948, Natural evapotranspiration from open water bare, soils and grass: *Royal Society Proceedings, Series A*, vol. 193. p. 120-145.

- Piper, A.M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis: American Geophysical Union Transactions, v. 25, pt. 6, p. 914-923.
- Richardson, S.M., y McSween, H.Y., 1989, *Geochemistry*: Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 488 p.
- Rodier, J.M., 1990, Análisis de aguas (aguas naturales, aguas residuales y agua de mar): Barcelona, Omega, p. 1059.
- Rodríguez-Castillo, Ramiro, y Ochoa, C.A., 1989, Estudio geoelectrico del sistema acuífero de la cuenca de México: Geofísica Internacional, v. 28, núm. 2, p. 191-206.
- SARH, 1970-1987, Datos del Valle de México: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, Boletín de Mecánica de Suelos, núms. 7-10 (sin pág.).
- 1973-1988, Datos estadísticos: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, Boletín Hidrológico, núms. 25-40 (sin pág.).
- 1981, Estudio geohidrológico preliminar de la zona Apizaco-Soltepec, estado de Tlaxcala: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Gerencia de Zonas Áridas, Acuaplán, S.A., Contrato GZA-81-93-GD, 100 p.
- 1983, Perfiles geofísicos en diferentes zonas de la cuenca del Valle de México: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Comisión de Aguas del Valle de México, Construcciones Alas, Reporte núm. 88.418, 90 p.
- Schoeller, Henri, 1955, Géochimie des eaux souterraines—aplication aux eaux des gisements de pétrole: Institut Français du Pétrole et Analyses des Combustibles Liquides, Rev., 213 p.
- SS (Secretaría de Salud), 1996, Norma Oficial Mexicana, NOM 127, SSA, salud ambiental, agua para uso y consumo humano: México, D.F., Diario Oficial, Enero, 1ª sección, p 40-50.
- Struckmeier, W.F., y Margat, J., 1995, Hydrogeological maps—a guide and a standard legend: IAH, v. 17, Ed. Verlag Heinz Hiese, 177 p.
- Thiessen, A.H., 1911, Precipitations averages for large areas: Monthly Weather Rev., Julio, p. 1082.
- Turc, L., 1954, Le bilan d'eau des sols; reations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. La Houille blanche, 3 journées de l'hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Paris, p. 36-44.
- US-EPA, 1984, Methods for chemical analysis of water and waste-waters: Washington, D.C., U.S. Environmental Protection Agency 16-74000.
- UNESCO, 1983, International legend for hydrogeological maps, Revised edition: Paris, UNESCO Technical Documents, SC-84/WS/7, 51 p.
- World Health Organization (WHO), 1984, Guidelines for drinking water quality recommendations I. WHO. Geneve.

Manuscrito recibido: 26 de junio de 1995

Manuscrito aceptado: 26 de enero de 1998