

Evaluación hidrogeológica de la subcuenca de Tecocomulco, Estados de Hidalgo, Puebla y Tlaxcala, México

**Rafael Huízar-Álvarez¹, Oscar Campos-Enríquez²,
Luis Miguel Mitre-Salazar¹, David Alatríste-Vilchis²,
Teodoro Méndez-García¹ y Faustino Juárez-Sánchez²**

¹ Instituto de Geología, ² Instituto de Geofísica;
Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México, D.F. 04510.

RESUMEN

El modelo hidrogeológico de la subcuenca de Tecocomulco corresponde a una fosa tectónica de orientación NE-SW, que se amplía en extremo noreste. El relleno de esta fosa, de arriba hacia abajo, está constituido por ~600 m de sedimentos aluviales y volcanoclásticos, rocas volcánicas de diferente composición con un espesor de 500 a 1,500 m, y más abajo, aquellas de tipo calcáreo. En este trabajo se consideran éstas como unidades hidrogeológicas que tienen conexión hidráulica entre sí y forman un sistema acuífero. Hacia el centro de la planicie existe un acuitardo, que cubre parcialmente a la parte intergranular del sistema acuífero donde se comporta como semiconfinado.

El modelo geológico regional permite indicar que las subcuencas de Tecocomulco, Apan y Sahagún tienen comunicación hidráulica entre sí a través de fracturas en las unidades consolidadas, así como por el material aluvial que subyace al relieve volcánico cuaternario. Considerando esto y la posición topográfica más alta de Tecocomulco, se considera que ésta es parte del área de recarga de las subcuencas de Apan y Sahagún. La configuración de datos piezométricos determina un gradiente hidráulico horizontal regional de 0.009 ⁰/₁₀₀, donde el flujo es de Tecocomulco hacia Apan y Sahagún. La interpretación de los índices geoquímicos Cl / HCO_3^- y $(SO_4^{2-} + HCO_3^-) / Cl$ confirma esa dirección del flujo subterráneo como E-W.

El registro de conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea en dos piezómetros instalados en la planicie, muestra que entre 5 y 50 m de profundidad existen flujos verticales ascendentes y descendentes; de 70 a 80 m de profundidad el flujo de agua es ascendente y, a mayor profundidad, el flujo es nuevamente descendente. Esto indica la existencia de flujos subterráneos locales, intermedios y regionales.

El contenido de *E. coli* y *Enterobacter* en el agua subterránea varía de un sitio a otro pero, en general, está por encima del límite permisible, definiendo un agua relacionada con sistemas de flujo muy dinámicos y poco profundos.

Del balance de agua subterránea resulta un pequeño excedente de agua, sin embargo, este excedente es parte de la recarga hacia las áreas adyacentes, pero sobre todo es el que hace posible la existencia del Lago de Tecocomulco.

Palabras clave: Lago Tecocomulco, graben, mapa hidrogeológico, flujo ascendente, calidad del agua

ABSTRACT

The hydrogeologic framework of the Tecocomulco sub-basin corresponds to a NE-SW tectonic graben, widening at its northeastern portion. The graben infill is constituted by ~600 m of alluvial deposits and volcanoclastic sediments, 500 to 1,500 m volcanic rocks of different composition, and below, rhyolitic rocks and finally a calcareous local basement are found. In this paper each rock unit is considered a hydrogeological unit with hydraulic connection and forming an aquifer system. An aquitard exist toward the center of the plain that covers partially the intergranular part of the aquifer system, where it behaves as semiconfined one.

The regional geologic framework indicates that the subbasins of Tecocomulco, Apan and Sahagún have hydraulic communication through fractures in the consolidated units as well as through alluvial material that underlies the Quaternary volcanic relief. Considering the relative highest topographical position of the Tecocomulco sub-basin with respect to the other ones, it is concluded that it constitutes part of the recharge area of the others sub-basins. The configuration of piezometric data determines a regional horizontal hydraulic gradient of 0.009⁰/100, where the flow is from Tecocomulco towards Apan and Sahagún. The interpretation of the geochemical index Cl^- / HCO_3^- y $(SO_4^{2-} + HCO_3^-) / Cl^-$ confirms the direction of the groundwater flow as E-W.

The measurements of electric conductivity and temperature of the groundwater in two piezometers installed in the plain, show upward and downward vertical components of flow between 5 and 50 m; while from 70 to 80 m depth the flow is upward and, deeper the flow is again downward. This suggests the existence of local, intermediate and regional groundwater flows.

*The content of *E. coli* and *Enterobacter* in the groundwater vary from place to place, but in general it is above the permissible limits, suggesting that such water is related to very dynamic and relative shallow flow systems.*

The groundwater budget show a small surplus of water, which is also part of the recharge toward the adjacent areas and it is one that makes possible the existence of the Tecocomulco Lake

Keywords: Tecocomulco lake, graben, hydrogeologic map, upward flow, water quality

INTRODUCCIÓN

Un problema serio en México, y que tiene una repercusión importante en los ámbitos del desarrollo, es el relacionado con el abastecimiento de agua potable para la población; y el disponible actualmente presenta en muchos casos riesgos a la contaminación, debido a un manejo inadecuado.

Una parte fundamental en las tareas por desarrollar corresponde a la generación de información hidrogeológica, la cual debe ser consistente con la información geológica, ya que la integración de éstas permitirá conocer con detalle la naturaleza, el funcionamiento y la vulnerabilidad de los sistemas acuíferos a escalas locales y regionales.

Para poder llevar a cabo el análisis propuesto, en este estudio se analiza la problemática que se presenta en la subcuenca de Tecocomulco, problemas que afectan no solo las reservas y la calidad del agua subterránea de esta zona, sino también al agua superficial, pues en esta zona aún existe un reducido cuerpo de agua superficial que forma el último de los lagos históricos de la Cuenca de México.

La superficie de Tecocomulco presenta una intensa deforestación que ha propiciado directamente el incremento del escurrimiento superficial y consecuentemente ha disminuido la infiltración. Adicionalmente, existen intensos problemas de erosión de suelos, produciendo con ello una gran cantidad de sedimentos que han azulado prácticamente al lago de Tecocomulco. Lo anterior es una prueba inequívoca del manejo inadecuado que se ha venido dando en el aprovechamiento de los recursos naturales de la zona. Otro problema importante es la infiltración directa en el suelo del agua residual del drenaje de las poblaciones, constituyendo un potencial de contaminación para el agua subterránea.

La presencia de las diversas actividades antrópicas se manifiesta naturalmente en una degradación ambiental importante y evidente, conduciendo a cambios climáticos locales observables en los contenidos de humedad del suelo. Es importante señalar que, a pesar de los problemas señalados, no existen antecedentes de estudios de índole hidrogeológica que describan esas propiedades en esta zona.

La zona tiene 585 km² de superficie, de los cuales 95 km² corresponden a la planicie, el resto se distribuye entre relieves de lomeríos y la zona de montaña (Figura 1).

Para determinar y explicar las características hidrogeológicas de esta zona, se precisa cumplir con los siguientes objetivos: 1) establecer el modelo geológico conceptual del sistema acuífero local y regional; 2) conocer las características hidrogeológicas de la subcuenca de Tecocomulco; 3) analizar el balance hidrogeológico y aportar en síntesis conocimiento del sistema de flujo subterráneo de esta zona.

Propósitos y alcances—aspectos metodológicos

Uno de los propósitos de este trabajo es, mediante el conocimiento hidrogeológico del área de Tecocomulco, contribuir a entender el funcionamiento de los sistemas de flujo subterráneo en la gran Cuenca de México. El modelo conceptual está basado en el marco geológico, que su vez está apoyado en estudios de geología de campo, geofísicos (estudios geoeléctricos de resistividad, gravimetría y magnetometría) (Figura 2). Con base en esa información, se elaboraron secciones geológicas en sitios seleccionados para determinar el control hidrológico o efectos por la configuración del basamento y la topografía.



Figura 1. Localización de la subcuenca de Tecocomulco dentro de la Cuenca de México y ubicación de los sitios de muestreo.

La dirección del flujo subterráneo se describe con base en la configuración del nivel de agua y la geometría preliminar del sistema hidrogeológico. La recarga se evaluó mediante la ecuación del balance del agua subterránea, que se rige por el principio de continuidad, y aplicando la fórmula de Darcy.

Las características hidrogeoquímicas del agua se obtuvieron a partir de los análisis físicoquímicos y bacteriológicos de muestras de agua obtenidas durante diez periodos en 18 sitios, de los cuales seis corresponden a pozos, cuatro a norias y siete son manantiales (Figura 1; Tabla 1); estos sitios representan el 70% de los aprovechamientos subterráneos del área y fueron seleccionados de manera aleatoria. El periodo de muestreo cubre de enero de 1997 a octubre de 1999. Los primeros cinco muestreos fueron mensuales y los cinco siguientes se efectuaron cada 5 meses. Los análisis se realizaron en el Instituto de Geología de la UNAM, según los procedimientos de la APHA-WWA-WPCF (1994) y la US-EPA (1984) (Tabla 2).

La temperatura, conductividad eléctrica (C.E.) y pH, se midieron *in situ*, corroborándose en el laboratorio.

En 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 Stiff (1951) se utilizó para representar la composición química y calidad del agua de Tecocomulco para consumo humano.

El cálculo de la precipitación, la evapotranspiración real y temperatura para el periodo de 1970 a 1988 se efectuó a partir de datos registrados en 9 estaciones

meteorológicas, mediante las fórmulas de Thiessen (1911), Turc (1954) y Coutagne (1954) respectivamente. El escurrimiento superficial se evaluó con base en datos obtenidos por la Comisión de Aguas del Valle de México, para el periodo 1980-1994. La carta hidrogeológica obtenida se basa en los criterios de la UNESCO (1983) y de Struckmaier y Margat (1995).

Trabajos previos

Las investigaciones previas, dentro de las cuales se incluye a Tecocomulco, son básicamente de índole geológica y de carácter regional. Por su relación con este estudio se pueden mencionar las siguientes: Mooser *et al.*, (1974) y Mooser, (1975) muestran dataciones de rocas volcánicas en la parte oriental del Sistema Volcánico Mexicano (SVM). Demant (1978) subdivide el SVM en regiones petroquímicas y describe la evolución del mismo. Robin (1976, 1978), por su parte, explica la existencia de volcanismo básico en la parte oriental de México y su relación con la subducción. Ledezma-Guerrero (1987) realiza la geología de esta zona a una escala 1:100,000. Castro-García y Córdoba-Méndez (1994) describen la petrografía de las rocas volcánicas del límite noreste de la subcuenca.

Referente al agua subterránea, existen mediciones del nivel de agua realizados por la Comisión de Aguas del Valle de México, durante el periodo 1970-1984. Blásquez (1956) realiza un balance hidrológico, Birkle *et al.* (1996) estimaron el valor de la evapotranspiración.

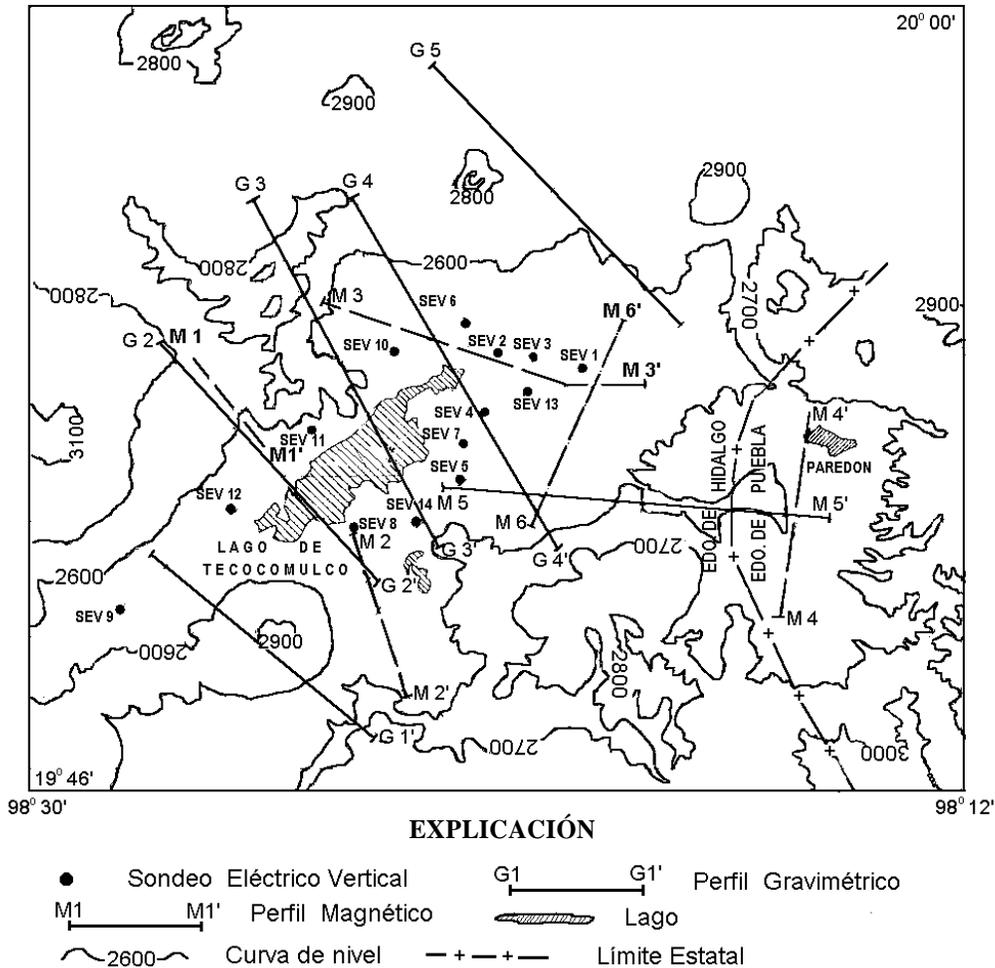


Figura 2. Localización de los perfiles geofísicos y secciones hidrogeológicas.

Marín-Córdova *et al.* (1990) realizan la carta hidrogeológica sinóptica de la República Mexicana.

Aspectos culturales

En esta subcuenca existen aproximadamente 14,900 habitantes, y como principales localidades están: Paredón, Tres Cabezas, Tepozán, Tecocomulco, Francisco Sarabia, Alcantarillas y San Miguel Allende.

La principal actividad económica de la población es la agricultura, complementada con ganadería principalmente ovina, de forma extensiva. La agricultura es de temporal y sus principales productos son cebada y avena, ambos productos para el mercado exterior, maíz y, en algunos sitios se cultiva papa. Otra actividad de importancia local es la caza de pato, garza y rana, que constituyen una fuente de comercio local en menor proporción que la agricultura y la ganadería.

Hasta 1990, la producción de pulque fue una acti-

vidad económica importante en esta zona. Hoy día sólo se practica a nivel familiar. El abandono de esta actividad promovió la erosión del suelo debido a la masiva desaparición de superficies de magueyes para ocuparlas en agricultura. El recurso forestal se explota para la construcción, como energético y para comerciar la madera que así se obtiene.

Los usos del agua en esta zona son principalmente doméstico y de abrevadero. Asimismo, existen pozos que extraen agua subterránea para exportarla a localidades ubicadas fuera de la zona estudiada, tales como Tepeapulco, Ciudad Sahagún y Singuilucan entre otros. La población local abastece sus necesidades de agua a partir de manantiales, norias y algunos pozos.

MARCO FÍSICO

El relieve de la subcuenca de Tecocomulco está dispuesto en forma elíptica y en su interior encierra una

Tabla 1. Resultados de análisis fisicoquímicos del agua subterránea de la subcuenca de Tecocomulco, Hgo. Valores en mg/L, con excepción del pH y C.E.

No.	pH	C.E	STD	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂	PO ₄	B	Co	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
1	7.204	245	131.1	18.84	17.75	20.22	9.23	117.38	21.01	12.81	6.20	0.089	0.140	0.638	0.001	0.027	0.0008	0.005	0.001	0.024
2	7.273	212	479.0	27.66	17.27	17.77	7.79	147.08	14.13	21.67	1.46	0.014	0.372	0.38	0.001	0.003	0.002	0.004	0.0007	0.026
3	7.196	293	575.0	23.55	20.53	17.28	32.10	143.34	23.89	34.11	9.83	0.043	2.620	0.347	0.025	0.031	0.007	0.032	0.008	0.036
4	7.66	218	176.0	20.61	11.29	6.26	3.03	85.73	14.18	19.30	0.17	0.014	-0.322	0.285	0.003	0.002	0.001	0.004	0.001	0.038
5	7.414	260	196.5	22.49	9.05	7.94	7.20	78.99	16.48	6.34	0.18	0.002	0.076	0.296	0.023	0.032	0.006	0.021	0.005	0.019
6	7.619	163	226.7	19.04	12.04	19.99	6.02	113.28	20.02	8.71	0.50	0.010	0.088	0.358	0.024	0.023	0.006	0.019	0.004	0.034
7	7.54	274	416.2	27.30	15.96	31.38	8.58	195.78	19.81	3.28	0.80	0.024	0.043	0.264	0.021	0.072	0.011	0.027	0.005	0.03
8	7.476	155	216.0	17.23	12.53	17.76	6.25	109.74	16.66	25.21		0.006	0.430	0.431	0.03	0.038	0.005	0.018	0.002	0.03
9	7.474	198	320.5	19.37	15.68	14.87	9.37	118.03	28.96	13.32	2.68	0.009	0.323	0.437	0.021	0.169	0.008	0.022	0.003	0.047
10	7.116	1038	1,510	83.17	46.47	82.35	31.45	289.33	83.75	109.01	34.47	0.045	0.911	0.207	0.018	0.045	0.006	0.024	0.004	0.059
11	7.443	331	351.0	39.08	24.57	18.28	9.44	214.39	20.72	15.59	0.85	0.009	0.025	0.348	0.013	0.046	0.008	0.019	0.004	0.038
12	7.566	384	588.9	33.18	32.03	36.30	12.51	305.45	19.31	6.13	0.79	0.021	-0.001	0.373	0.015	0.053	0.106	0.021	0.004	0.055
13	7.358	313	490.4	32.46	33.93	37.76	11.95	248.40	19.92	8.25	0.57	0.058	0.508	0.420	0.013	0.027	0.02	0.029	0.006	0.015
14	7.44	230	203.5	26.85	21.04	22.65	7.46	193.08	17.41	25.48	0.27	0.011	-0.143	0.310	0.024	0.02	0.005	0.019	0.004	0.06
15	7.409	492	512.8	38.97	42.97	42.34	16.72	346.02	19.99	36.70	0.35	0.068	1.258	0.268	0.001	0.173	0.133	0.029	0.004	0.069
16	7.32	231	210.4	21.76	22.41	17.71	7.67	156.64	18.92	10.24	3.56	0.010	0.204	0.354	0.035	0.087	0.005	0.033	0.005	0.064
17	7.365	490	811.0	65.13	53.55	69.23	26.08	399.66	37.76	39.65	2.25	0.010	1.000	0.148	0.0007	0.014	0.003	0.003	0.001	0.03
18	7.503	730.8	1,110.0	69.92	29.33	86.93	27.31	463.42	44.15	12.73		0.032	1.022	0.202	0.022	0.032	0.025	0.034	0.005	0.016
19	7.083	167.5		19.54	8.83	7.22	3.71	82.97	23.06	12.61										

C.E.—conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$
 STD—sólidos totales disueltos

planicie. En el sector norte, el volcán La Paila y varios conos volcánicos forman un relieve sin erosión, a diferencia de la caldera Chichicuatlá que presenta un relieve circular de paredes tabulares y drenaje paralelo. La parte norte de la caldera desapareció por posibles efectos tectónicos. En el lado este, el relieve constituido por material piroclástico forma una meseta que se extiende de SE a NW; en él sobresalen los volcanes La Minilla y Tecoloquilo; el relieve está disecado por cauces paralelos. Hacia el sur, la coexistencia de relieves terciarios y cuaternarios imprime más diversidad de relieve (valles aluviales, conos volcánicos y mesetas), sobresaliendo en la esquina sureste donde se tiene la mayor elevación de la subcuenca (3,300 msnm) en el relieve de agujas y paredes volcánicas de la Sierra El Tepozán, donde destaca el Cerro La Peña. A su vez existen esculpidas paredes y bloques semitabulares que forman mesetas. Este relieve está orientado en una dirección NW-SE. Hacia el occidente, el relieve del norte y del sur se aproximan uno a otro y forman el límite occidental de la zona de estudio, existiendo tan sólo un estrecho valle y determinando así una cuenca cerrada.

La planicie se extiende de este a oeste con una prolongación hacia el sureste interrumpida en parte por derrames volcánicos, tiene una elevación promedio de 2,550 msnm. A partir de esta altura se elevan los relieves volcánicos que llegan hasta 3,200 msnm.

La subcuenca de Tecocomulco pertenece a la gran

Cuenca de México y se ubica en su parte noreste (Figura 1). Desde el punto de vista hidrológico está caracterizada por un drenaje de naturaleza endorréica. Los ríos que descienden de las partes altas transportan cantidades importantes de azolve como resultado de la fuerte erosión debida al mal uso del suelo que ha ocasionado una intensa deforestación de las partes altas.

Tabla 2. Parámetros, métodos y límites de detección empleados en los análisis químicos.

Parámetro	Método	Límite inferior en mg/L
Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Absorción atómica de flama	0.09
Na ⁺ , K ⁺	Flamometría	0.04
CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻	Titulación con H ₂ SO ₄ 0.01 N	0.12
Cl ⁻	Titulación empleando AgNO ₃ 0.005N	1.0
SO ₄ ²⁻	Turbidimétrico y electrodo selectivo	0.20
NO ₃ ⁻	Método de la brucina	1.0
Elementos traza	Absorción atómica	< 0.2

Los cauces principales son: Cuatlaco, Sarabia, Toronjil y Tepozán, que drenan las partes más activas de la zona. Prácticamente toda el agua que fluye por estos ríos en época húmeda se almacena en la planicie formando el lago de Tecocomulco e inundando áreas agrícolas. Durante la época seca, sólo los ríos Cuatlaco y la parte alta del río Tepozán conducen agua.

En 1950 se intentó drenar la cuenca de forma artificial, para lo cual se construyó el canal de Tecocomulco, afortunadamente para la conservación natural, éste se azolvó y el lago pudo así conservarse. En la actualidad por ese canal sólo fluye agua cuando existe un excedente de agua en el lago.

La estación hidrométrica San Jerónimo aporta un valor muy fraccionado del escurrimiento superficial de esta subcuenca pues, no obstante el haber construido el canal de Tecocomulco, el drenaje endorréico de la subcuenca no cambió, por lo que el caudal registrado en esa estación corresponde en esencia a la porción más occidental de la planicie que no drena hacia el lago, no obstante, en épocas excepcionales registra agua procedente del drenaje del lago.

El caudal medio anual medido en esa estación es de 4,098 m³/año. La gráfica en la Figura 3 muestra que, con algunas excepciones, la tendencia del escurrimiento es a crecer. Esta tendencia no se debe confundir, pues no es que la lluvia sea cada vez mayor, sino que ese aumento se relaciona con el incremento de la superficie deforestada que retiene cada vez menos agua y, por lo tanto, se reduce el volumen de la infiltración, mientras que la evaporación también aumenta.

La precipitación presenta tres periodos; a) en el ve-

rano (junio–septiembre) que aporta el 70% de la precipitación, sus valores promedios extremos son 60 y 151 mm; b) en el invierno (noviembre–enero) con el 20 % de la lluvia cuyos valores son de 4 a 30 mm; c) un periodo de transición (octubre, abril y mayo) con el 10% de precipitación. La precipitación media anual de la zona es de 779.2 mm y varía espacialmente de 550 mm en la planicie a 1,117 mm en la montaña (Figura 4).

La temperatura local varía en relación con la topografía. De esta manera, las temperaturas más altas se presentan en la planicie y las temperaturas más bajas en la parte montañosa. Los valores extremos varían de -4°C en enero a 30°C durante el mes de mayo; la media anual de toda la zona es de 13.5°C. La evapotranspiración registra sus mayores valores durante la primavera y el verano, alcanzando una media anual de 550 mm y una máxima mensual de 114 mm durante el mes de mayo.

GEOLOGÍA

El marco geológico de la subcuenca de Tecocomulco está constituido por rocas volcánicas de composición ácida a básica de edad miocénica a holocénica (Ledezma-Guerrero, 1987). La erosión de esas rocas ha originado un importante espesor de sedimentos lacustres y aluviales que varían tanto en su granulometría como en sus espesores.

El fracturamiento común en la cuenca es NW-SE, NE-SW y EW. La frecuencia de fracturamiento es muy similar entre los dos primeros y la mayor actividad volcánica se presentó en los dos últimos sistemas de

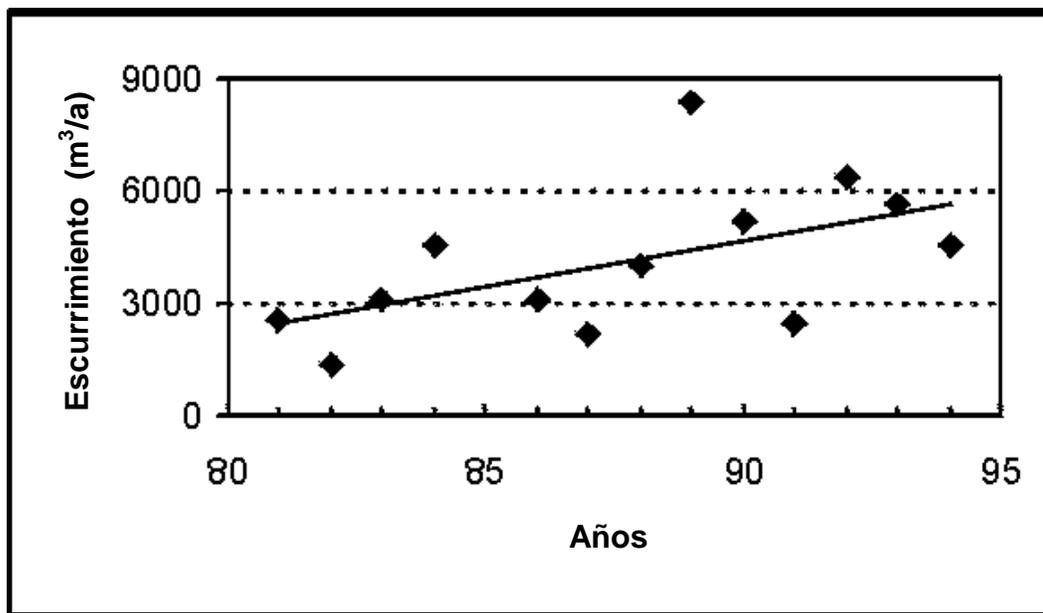


Figura 3. Gráfica de la evolución del escurrimiento en la subcuenca de Tecocomulco para el periodo 1980-1996.

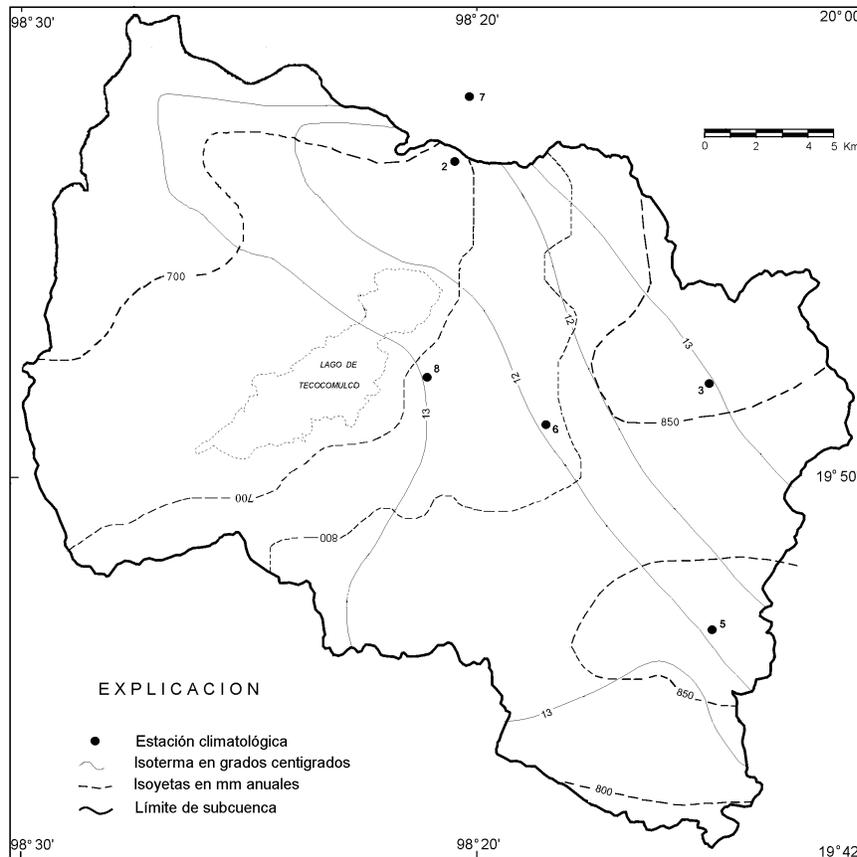


Figura 4. Mapa de isoyetas e isotermas medias anuales.

fracturas durante el Plioceno-Pleistoceno (Demant, 1978; Negendak, 1972).

Las lavas de esta parte del SVM fueron emitidas entre 9 Ma y 8,000 años (Robin 1976, 1978; Demant, 1978), formando mesetas de lava y conos volcánicos.

Los trabajos de geología regional de Mooser (1975) y Ledezma-Guerrero (1987) reportan las relaciones estratigráficas y estructurales de las rocas locales. Sin embargo, la presente investigación muestra que la disposición y distribución de algunas unidades litológicas dentro del área de Tecocomulco es diferente a las descritas por esos autores. No obstante, esos trabajos ayudan parcialmente a definir la cronología local (Lámina 1).

Terciario

Andesita El Peñón

Así llamó Ledezma-Guerrero (1987) a rocas de color gris claro que intemperizan a color crema, y contienen fenocristales de plagioclasa. Estas rocas forman relieves de más de 3,000 m y con frecuencia presentan cantiles de 60 m o más de altura. Sobreyaciendo a estas rocas se observa una andesita gris azulosa con matriz

holocristalina, fenocristales de plagioclasa y estructura lajeable. En su conjunto estas rocas forman el núcleo montañoso de la Sierra El Tepozán, lugar donde presentan un intenso fracturamiento con aberturas hasta de 20 cm. Al oriente del municipio de Chignahuapan, esta formación sobreyace directamente a las rocas marinas cretácicas y subyace a la riolita Chignahuapan

Unidad Riolita Chignahuapan (Tpch)

Está constituida por una secuencia de derrames de hialotraquita y riolita, dispuestos horizontalmente formando un relieve de meseta (Ledezma-Guerrero, 1987). En el área aquí descrita la riolita es fluidal y de color rosa, contiene abundante vidrio volcánico y esferulitas de 3 mm a 1.5 cm. La hialotraquita tiene textura fluidal y contiene minerales de oligoclasa y cuarzo.

En las inmediaciones de Las Vigas, la riolita subyace a tobas riolíticas de color blanco con abundante pómez, que a su vez subyacen a dacitas de color rosa. Toda la secuencia es afectada por un intenso fracturamiento con aberturas que varían entre 1 y 15 cm; en algunas ocasiones las fracturas están rellenas por calcita.

Al oriente de Tres Cabezas, estas rocas subyacen a importantes espesores de material piroclástico que engloba arenas pumíticas, tobas y tobas líticas. De

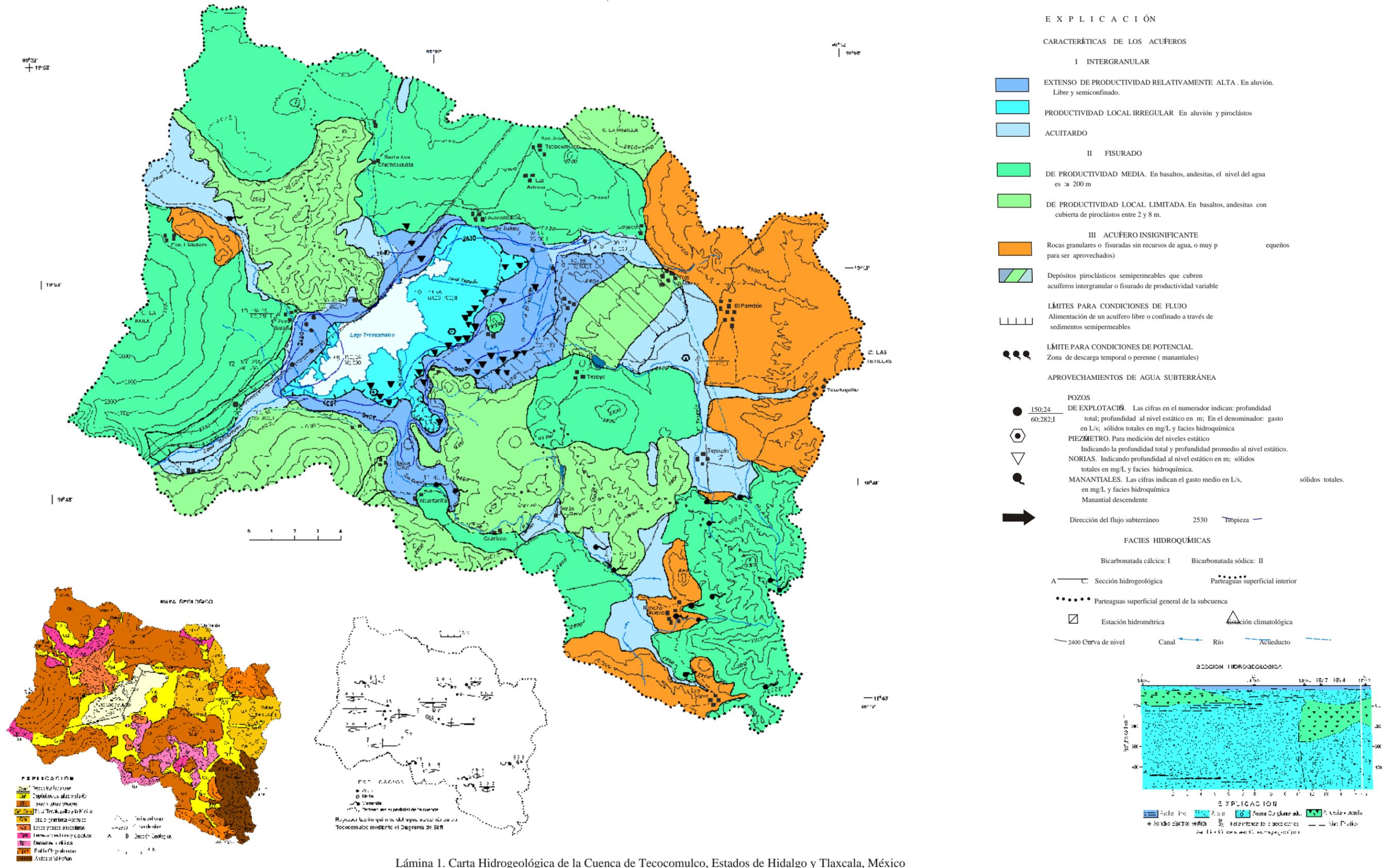


Lámina 1. Carta Hidrogeológica de la Cuenca de Tecocomulco, Estados de Hidalgo y Tlaxcala, México

igual forma subyacen a derrames de andesita y/o basaltos más recientes.

Plioceno

Unidad ácida (Tpr). Son rocas riolíticas de color rosa que intemperizan a gris claro y marrón, de matriz vítrea y textura porfídica con grandes fenocristales de cuarzo y feldespato, presentan estratos gruesos. En la porción sur de la subcuenca estas rocas son cubiertas por ignimbritas.

En toda la secuencia están afectadas por sistemas de fracturas horizontales, verticales e inclinadas y con orientaciones NW-SE, NW-SE. La frecuencia de las fracturas es variable, con una media de densidad de fracturamiento de $10 \times 10/m^2$. La abertura de las fracturas varía entre 1 cm y 20 cm. Este relieve ocupa una superficie considerable dentro del área estudiada y forma mesetas, relieves abruptos o redondeados, como se observa en las localidades de Tepepatlaxco y Mariano Matamoros. Donde ese relieve está afectado por fallas normales existen depresiones como son los valles de Cuatlaco y Rancho Nuevo. En el Lago Tecocomulco también se interrumpe por falla, y aflora luego al norte en las inmediaciones de Francisco I. Madero. En toda esa superficie, la riolita subyace a rocas andesíticas y andesitas basálticas más jóvenes. Los espesores de este conjunto de rocas se estiman hasta 600 m.

Unidad intermedia básica (Tpa). Formada por rocas volcánicas (andesitas, latitas) de color gris oscuro que intemperizan a color gris claro, de textura porfídica, con andesina, hiperstena y hornblenda. También existen andesitas porfídicas de color rosa. Estas rocas constituyen el Cerro La Minilla, en donde subyacen a tobas riolíticas y están afectadas por fracturas verticales e inclinadas orientadas al NW-SE y NE-SW. En la porción noroeste constituyen la estructura semicircular de la Caldera Chichicuatlá, interrumpida en su parte norte probablemente por una falla de dirección NE-SW, ahí, las fracturas son verticales con dirección NE-SW y E-W. Al oeste, forman el alto relieve El Jigüingo, culminado por domos dacíticos más recientes.

Los derrames andesíticos están afectados por fracturas, tanto de enfriamiento como tectónicas, que determinan una estructura de bloques. Es de destacar la cantidad de fracturas que presentan estas rocas en direcciones variables, con densidad de fracturamiento hasta de $20 \times 20/m^2$, en otras es de $15 \times 15/m^2$, y con aberturas entre 1 y 10 cm.

Cuaternario

Las rocas incluidas en este período se dividen, por su composición química, en ácidas y básicas y, por su relación estratigráfica pueden separarse de forma relativa en Cuaternario inferior y Cuaternario superior.

Cuaternario inferior básico

Andesitas (Qa). En la zona de Cocinillas y al noroeste del poblado de Francisco Sarabia, afloran lavas andesíticas basálticas de color gris oscuro que sobreyacen a la unidad ácida (Tpr) y subyacen a rocas basálticas cuaternarias. La andesita tiene una matriz microlítica, textura afanítica, presenta minerales de andesina y fenocristales pequeños de olivino. Estas rocas presentan un intenso lajeamiento asociado a fracturas de enfriamiento y otras de origen tectónico. El fracturamiento tiene una densidad de hasta $20 \times 20/m^2$ y las aberturas varían entre 2 y 10 cm, raramente están rellenas.

Cuaternario inferior ácido

Ignimbrita Acoculco (Qra). Unidad integrada por rocas piroclásticas que cubren la superficie desde Tres Cabezas hasta Acoculco, fuera del área aquí descrita. López-Hernández y Castillo (1997) infieren que esta ignimbrita fue emitida por una supuesta caldera de Acoculco. Los sedimentos engloban horizontes de arena pumítica, arena volcánica y toba lítica, interestratificados con depósitos fluviales, y con una inclinación de 10° al SE. Las capas de tobas y arenas miden desde 2 cm hasta 5 m de grosor y entre ellas hay horizontes de arcilla de hasta 2 m de espesor. En la zona, esta secuencia tiene un espesor de 150 m, pero posiblemente alcance los 200 m. La secuencia sobreyace a la Formación Chignahuapan y subyace parcialmente a derrames de basalto, a su vez se interdigita con la Toba Tecoloquillo. Todo el paquete de sedimentos está afectado por fracturas NW-SE, SW-NE y E-W.

En la zona de Tres Cabezas el paquete expuesto consta de piroclastos con horizontes verticales de diferente granulometría y en espesores que varían entre 2 y 70 cm. Está integrado por una ignimbrita que intemperiza a colores claros y oscuros, tiene textura vitroporfídica fluidal con abundancia de esferulitas y obsidiana, se trata de capas de lapilli, pómez y ceniza fina de aspecto arcilloso. Estos materiales cubren a riolitas fluidales afectadas por fracturas verticales con aberturas de 5 cm y, en conjunto, forman un domo de 30 km^2 sobre el cual se asienta el poblado de Tres Cabezas. Ese domo está limitado al oeste por una falla normal.

Cuaternario superior

Toba Tecoloquillo y Minilla (Qrt-Qrm). La forman tobas finas y tobas pumíticas de tipo sillar, que cubren parcialmente a la riolita Chignahuapan, a las andesitas terciarias y se interdigita con la Ignimbrita Acoculco. Las tobas provienen de la erupción de los volcanes Tecoloquillo y La Minilla y ocupan un área extensa en la parte oriental de la zona. El espesor expuesto es de casi 100 m y posiblemente alcance los 200 m. Esta secuencia piroclástica termina con la emisión de domos riolíticos que coronan dichos volcanes.

Basaltos y conos cineríticos (Qb). Estas rocas se distribuyen por toda la subcuenca, pero principalmente

en los sectores norte, oeste y sur, en donde forman relieves altos constituidos por derrames de lava y conos cineríticos de composición básica. Ledezma-Guerrero (1987) clasificó a estas rocas como basalto de olivino. Estas rocas tienen una matriz holocristalina y microlítica, presentan minerales de labradorita, albita, andesina y abundante olivino. Las lavas presentan estructuras variadas, pueden estar en brecha, malpaís, en bloques y algunas son acordonadas.

La cantidad y distribución de los volcanes y conos cineríticos, responden a un sistema de fracturas y/o fallas de orientación predominante NE-SW y E-W, que ha sido relacionado a eventos tectónicos propios del cuaternario (Negendank, 1972; Demant, 1978; Bloomfield, 1975). Esto explica la disposición principal del relieve local con orientación E-W, delimitando a la planicie de Tecocomulco, que corresponde con una fosa tectónica que ha sido rellenada por material volcánico.

Todas las rocas volcánicas presentan fracturamiento con la misma orientación de los lineamientos arriba mencionados.

Aluvión y depósitos lacustres (Qal -Qlac). Este material constituye el relleno de las partes semiplanas de los valles Cuatlaco, Tres Cabezas-Paredón-Tepozan y la planicie de Tecocomulco. La composición química del relleno sedimentario varía de básica a ácida y se constituye de arcillas, limo, arenas y conglomerados dispuestos en estratos de espesor y extensión variables. Los sedimentos que constituyen el relleno corresponden a dos tipos de ambientes de depósito: fluvial y lacustre. En ambos casos es abundante la cantidad de piroclastos de caída libre.

La superficie lacustre ocupa la parte central de la planicie y representa el 50% de la parte plana. Los depósitos lacustres contienen restos fósiles de diatomeas y ostrácodos.

Los espesores asignados y/o conocidos para el relleno varían entre 1 y 1,200 m en el centro de la planicie.

MARCO ESTRUCTURAL

Los lineamientos regionales y locales, visibles en imagen LANDSAT y fotografía aérea, y la distribución de las rocas cretácicas y jurásicas cercanas a Tecocomulco, permiten relacionar a la planicie de Tecocomulco con una depresión tectónica definida por lineamientos NE-SW y NW-SE. Los estudios geofísicos (geoeléctrica, magnetometría y gravimetría; Figura 2) realizados durante esta investigación confirman esa idea y permiten definir la dimensión y forma de las depresiones locales delimitadas por esos lineamientos cuya edad pudiera ser cuaternaria. La presencia de esta estructura había sido inferida con anterioridad por Blázquez (1956), Ledezma-Guerrero (1987) y Marín-Córdova *et al.* (1990).

Los lineamientos NE-SW que delimitan la fosa de

Tecocomulco se proyectan hacia el SW hasta las sierras Nevada y Las Cruces y posiblemente más allá. Por el norte, los rasgos se continúan hacia la Sierra de Pachuca mientras que por el sur su límite lo marca la Sierra de Apan.

La fosa de Tecocomulco incluye dos pequeñas depresiones, la de Cuatlaco y la de Paredón, de orientación E-W y NW-SE respectivamente (Alatraste-Vilchis, 1999). Este conjunto de depresiones queda incluida dentro de una depresión de mayores dimensiones, interrumpida por numerosas manifestaciones: domos volcánicos y conos cineríticos

Esta gran depresión está limitada al norte por un lineamiento NW-SE, asociado a los pliegues de la Sierra Madre Oriental y a fallas inversas paralelas a los pliegues documentados al NW de la zona por Suter (1990). El límite oriental pasa por Chignahuapan, 28 km al este de Tecocomulco, limitando un bloque rectangular alineado al NE-SW que constituye un pilar flanqueado por dos fosas a ambos lados. La zona de Tecocomulco se ubica precisamente dentro de la fosa occidental de dicho bloque.

Los resultados de las mediciones de gravimetría y magnetometría permitieron conocer la potencia del relleno de la planicie, la estructura geológica en profundidad de esta zona y la profundidad del basamento. En la interpretación de los datos de gravimetría se empleó el algoritmo de Talwani *et al.* (1959) para modelar en dos dimensiones, modificado para considerar los efectos de topografía. Las densidades empleadas para ajustar los perfiles trazados son similares a las usadas en la subcuenca de Apan (Huizar-Álvarez *et al.*, 1997).

La información generada por dos sondeos directos a 150 y 200 m de profundidad, fue complementada con mediciones magnetométricas, gravimétricas y 16 sondeos eléctricos verticales (Figura 2). La interpretación de esa información y su integración indica la existencia de dos grabenes comunicados y dispuestos, uno en orientación NE-SW y otro de NW-SE (Alatraste-Vilchis, 1999). El primero tiene su mayor amplitud en la parte este de la planicie y se estrecha hacia el oeste. El segundo tiene mayor amplitud que el primero, pero también disminuye hacia el sureste. En ambos casos se observa la existencia de escalones hacia el centro de los grabenes, que varían de 500 a 1,000 m y que afectan a las rocas volcánicas de profundidad. Ambas depresiones se continúan hacia sus respectivos extremos y esto indica que es posible la comunicación hidráulica hacia el exterior (Figuras 5 y 6). La comunicación hacia el exterior es más eminente a través del relieve cuaternario.

La información gravimétrica indica que el basamento de tipo calcáreo subyace a las rocas volcánicas y se encuentra a una elevación aproximada de 200 msnm, relacionada con valores de densidad de 2.7 g/cm^3 . Entre 200 y 1,800 msnm, se delimita un relleno volcánico indiferenciado, después de 1,800 y hasta 2,500 msnm se presenta el relleno aluvial. A partir del análisis de esta infor-

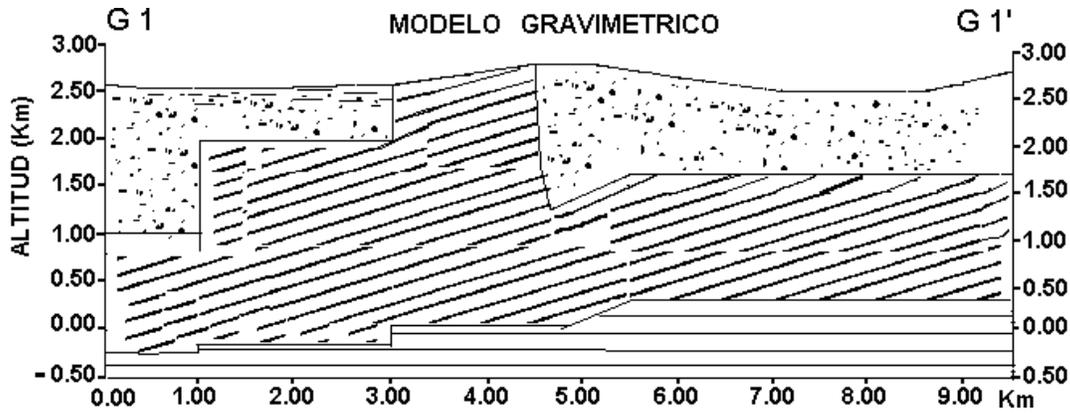


Figura 5. Perfil gravimétrico G1 - G1'. Ver explicación abajo.

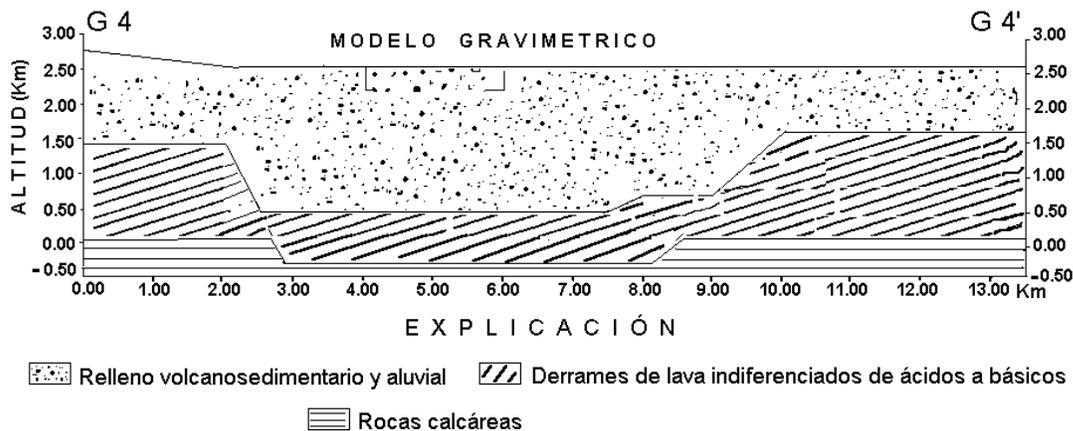


Figura 6. Perfil gravimétrico G4 - G4'.

mación se infiere que también el basamento está afectado por las fallas NE-SW.

La extensión lateral de las principales unidades acuíferas está definida por el afloramiento de materiales cuaternarios (lavas) que se interdigitan y/o sobreyacen a sedimentos fluviales y piroclastos, los cuales también constituyen unidades acuíferas más recientes. La parte de materiales terciarios representa unidades acuíferas menos prometedoras y corresponden a las rocas de composición ácida. Todas ellas en conjunto definen el sistema acuífero en Tecocomulco.

MODELO HIDROGEOLÓGICO

La litoestratigrafía que constituye la subcuenca de Tecocomulco ha sido agrupada en unidades que forman acuíferos, unidades confinantes y semiconfinantes. En las primeras, el bajo contenido de arcilla favorece un alto

coeficiente de permeabilidad horizontal. La diferencia clásica entre las dos últimas es que las unidades semiconfinantes tienen mucho menos arcilla que las confinantes. Esto determina un coeficiente de permeabilidad vertical importante que incrementa el movimiento del agua a través de ellas. Las unidades confinantes también pueden estar constituidas por flujos de lava muy poco permeables.

Las condiciones litoestratigráficas de esta subcuenca, caracterizadas por una geometría lenticular y de espesores variables, originan que condiciones de una unidad confinante se pasen a una semiconfinante o viceversa.

Unidades hidrogeológicas

Cuaternario aluvial (Qal)

Constituido por limos, arenas y conglomerados que forman el relleno de la planicie. En general, los conteni-

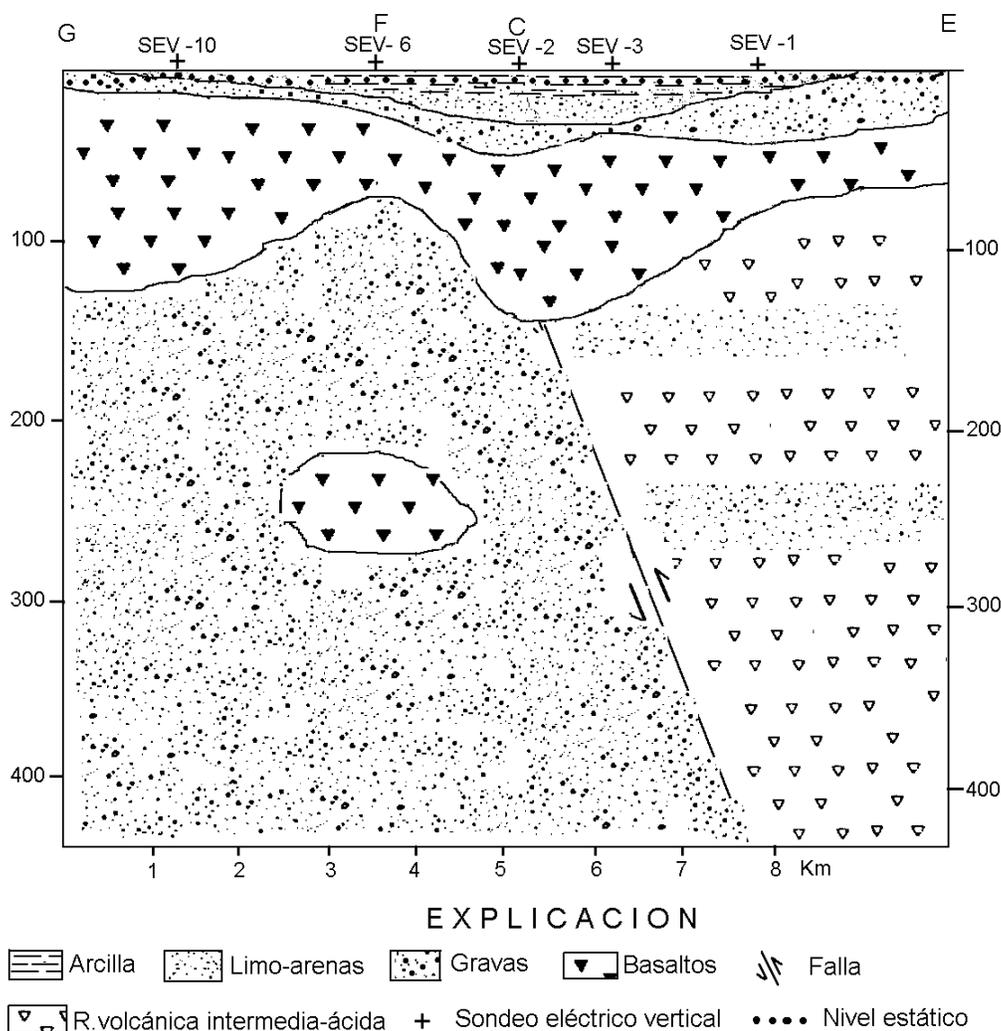


Figura 7. Sección hidrogeológica G-E, en la subcuenca de Tecocomulco.

dos de arcillas en esta unidad son bajos, pero en ocasiones constituyen capas de hasta 2 m y determinan la existencia de horizontes semiconfinantes.

Los resultados de sondeos geoelectricos verticales y los datos litológicos de pozos para agua indican espesores de hasta 600 m para los materiales granulares. El espesor de éstos disminuye hasta unos pocos metros hacia la periferia de la planicie (Figuras 7 y 8).

En profundidad, este relleno clástico, que constituye el principal acuífero del área, coexiste con derrames de lava interstratificados y con horizontes arcillolimosos. Las Figuras 7 y 8 muestran parte de la complejidad litoestratigráfica en la cuenca. En efecto, en la Figura 8, de arriba hacia abajo, se observa un estrato arcilloso de 20 m, seguido de un paquete aluvial con pequeños horizontes de limo-arcilla, todo en contacto lateral con un paquete de rocas volcánicas de 160 m de espe-

sor, que a su vez sobreyace a los sedimentos clásticos y, finalmente, en el fondo nuevamente existen arcillas y rocas volcánicas. En la parte central de la planicie de Tecocomulco, el material aluvial subyace a depósitos lacustres.

Lavas cuaternarias y terciarias (Tomvp, Tpa, Qa, Qb)

Son unidades volcánicas cuya composición varía de básica a intermedia, y constituyen parte del relieve y del relleno de la planicie de esta zona.

Estas rocas son definidas aquí como acuíferos y se presentan en estructuras de derrames fracturados, masivos, vesiculares, en conos cineríticos y/o aglomerados volcánicos. Hacia la planicie, estos materiales se interdigitan con el sedimento aluvial.

El fracturamiento que afecta a las rocas terciarias

aumenta considerablemente su conductividad hidráulica. Interstratificados con los derrames existen algunos lentes de arcilla que, en algunos sitios, originan pequeñas surgencias de agua subterránea. Los pozos que se han perforado indican derrames con espesores de hasta 100 m; naturalmente los máximos espesores se presentan en las montañas.

Riolitas (*Tpr*, *Tpch*)

Estas rocas se presentan en derrames de carácter masivo, estando en ocasiones afectados por fracturas. En algunos sitios se combinan o están cubiertos por horizontes de ignimbritas muy compactas y fracturadas, o por las unidades *Qrm*, *Qrt* y *Qra*, donde predominan partículas del tamaño de arena fina y arcilla.

En otros sitios, las riolitas subyacen a tobas muy compactadas de composición intermedia. Los depósitos piroclásticos adquieren una doble porosidad debido a la presencia de fracturas. No obstante eso, estos materiales forman horizontes poco permeables que originan pequeñas surgencias de agua en los sitios donde subyacen a rocas andesíticas o basálticas. En pocos casos, las ignimbritas intercaladas con las riolitas también presentan surgencias de agua subterránea insignificantes.

La baja conductividad hidráulica de las riolitas es incrementada por el denso fracturamiento que las afecta. Sin embargo, debido a que gran parte de las fracturas están rellenas y al carácter masivo de los derrames, se consideran como una unidad hidrogeológica semiconfinante.

Depósitos lacustres (*Qlac*)

Corresponden a una secuencia heterogénea de sedimentos donde predominan materiales amorfos, tobas y vidrio, con textura de limos y arcillas.

Los datos de ocho sondeos eléctricos verticales, apoyados en los núcleos de dos perforaciones realizadas en la planicie a 60 m y 80 m de profundidad (Figura 8), indican que los sedimentos lacustres tienen hasta 100 m de espesor y constituyen una secuencia rítmica de arcillas, limos y arenas, cuyos espesores varían entre 50 cm y 21 m para las arcillas, entre 50 cm y 4 m en los limos, y entre 20 cm y 5 m para las arenas.

En la parte noreste y sur de la planicie estos depósitos lacustres, que constituyen un acuitardo, se interstratifican con derrames de lava y sobreyacen a los materiales aluviales. Los datos geofísicos muestran que esta secuencia se repite a diferentes profundidades.

La estructura geológica arriba descrita permite definir el modelo hidrogeológico conceptual de la región de Tecocomulco, el cual consiste en una depresión tectónica orientada al NE-SW, con una elongación en dirección SE-NW en su extremo noreste, su lado SE presenta escalones hacia el centro de la fosa (Figuras 5 y 6).

Este *graben*, en su interior, contiene de arriba hacia abajo: sedimentos volcánicoaluviales y aluviales que en conjunto tienen un espesor promedio de 600 m; después existen rocas volcánicas de diferente composición en es-

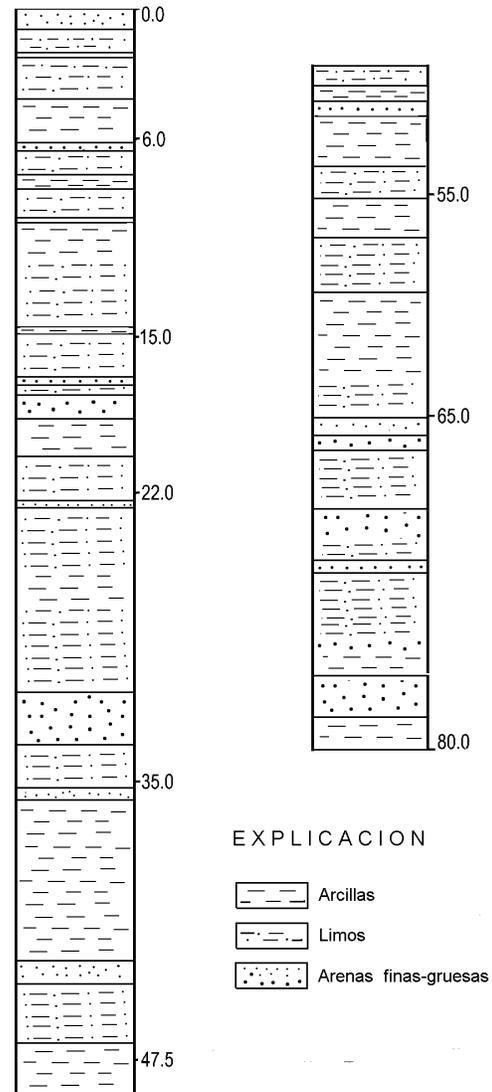


Figura 8. Perfil litológico del piezómetro Aguilera en Tecocomulco, Hidalgo.

pesores de 500 a 1,500 m. Finalmente sigue el basamento calcáreo.

Los derrames de lava, que constituyen el relieve de superficie, forman el área de recarga, mientras que la parte plana forma la zona de descarga local, la cual se hace a través del bombeo de pozos.

Considerando el arreglo de la estructura geológica regional, se interpreta que toda esta región se comporta como un área de recarga hacia los acuíferos adyacentes de Sahagún y Apan.

Confrontando este modelo con el de la subcuenca de Apan-Tochac propuesto por Huizar-Álvarez *et al.* (1997), se asume que en su porción SW la fosa de Teco-

comulco forma un solo acuífero con su homóloga de Apan, pues ambas fosas devienen en una sola. Hacia los lados restantes, la comunicación hidráulica entre esta región y las adyacentes es a través de fracturas. Sin embargo, con base en la estructura geológica y la densidad de las extracciones de agua subterránea, se considera que el flujo subterráneo más importante es hacia el SW.

Las unidades hidrogeológicas antes descritas tienen conexión hidráulica entre sí y forman un sistema acuífero en donde se distingue (ver Lámina 1):

- 1) un acuífero intergranular
- 2) un acuitardo
- 3) un acuífero fisurado.

Acuífero intergranular

En el relleno clástico que constituye la planicie, este acuífero se puede subdividir por la productividad evaluada a partir de la extracción de los pozos en: 1) extenso de productividad relativamente media-alta y, 2) de productividad local limitada.

Extenso de productividad relativamente media-alta

En los sedimentos volcánico-clásticos y aluviales una perforación a 210 m de profundidad en el lado oeste de la planicie muestra una alternancia de derrames de lava y sedimentos fluviales con presencia de conglomerados. Los sondeos geoelectrónicos verticales realizados en la planicie de Tecocomulco permiten estimar un espesor mayor a 600 m para este acuífero. En la parte centro-occidental de la planicie, el acuitardo cubre al acuífero intergranular y determina en éstas condiciones hidráulicas semiconfinadas que, hacia la periferia de la planicie, pasan a condiciones libres. Así mismo, al sur de la planicie existen pequeñas áreas donde el acuífero tiene condiciones semiconfinadas

Configuración del nivel del agua y funcionamiento hidráulico. La configuración del nivel del agua registrado en diversos aprovechamientos de agua, ubicados en el interior de la planicie durante el intervalo 1970–1998, muestra una correspondencia del gradiente hidráulico con la variación topográfica. Esto es, el agua se desplaza de las zonas altas hacia las zonas bajas. La superficie potenciométrica oscila en promedio desde 5 m de profundidad en el lado noreste de la planicie, hasta 68 m en los pozos del lado suroeste. Esta diferencia origina un gradiente hidráulico de $0.004 \text{ }^{\circ}/_{00}$ de NE a SW. En consecuencia, el espesor de la zona no saturada varía de 7 m en el lado oeste, 0 m en la zona de lago y se incrementa hasta 70 m en la salida de la subcuenca.

El nivel estático de esta zona tiene una oscilación promedio de 0.80 m por año, e indica su directa relación con el retardo de la recarga. Los datos de campo muestran que ésta se manifiesta al final de la época

húmeda e inicio de la época seca, por lo que el nivel del agua desciende durante la época seca y la parte inicial de la época húmeda.

La configuración de los datos piezométricos a nivel regional determina un gradiente hidráulico de $0.009 \text{ }^{\circ}/_{00}$, desde Tecocomulco hacia las zonas adyacentes que corresponden con las subcuencas de Apan y Sahagún.

El volumen de agua subterránea extraída en Tecocomulco es pequeño, sin embargo, se observa su influencia en el descenso del nivel estático. De igual manera que las salidas laterales hacia Apan, Sahagún y Tulancingo, también deben influir en la variación del nivel del agua. La extracción de agua en pozos indujo un descenso del nivel freático en el área de ± 0.04 m, para el intervalo 1980–1998.

Observaciones realizadas en piezómetros instalados en la planicie muestran que entre los cinco y 50 m de profundidad se combinan un flujo vertical descendente y ascendente; mientras que de 70 a 80 m de profundidad el flujo de agua es descendente (Huizar-Álvarez *et al.*, 1998a).

Parámetros hidráulicos. La interpretación de pruebas de bombeo realizadas en tres pozos de la planicie a caudal constante, a través de los métodos de Cooper y Jacob (1946), Theis (1935) y Cooper *et al.* (1967), aportan los siguientes resultados. La transmisividad (T) fue de 250 a $475 \text{ m}^2/\text{día}$, la conductividad hidráulica (K) presentó variaciones de 2.64 a $4.3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, en tanto que el coeficiente de almacenamiento (S) tuvo un valor de 10^{-3} .

Tradicionalmente este acuífero se ha explotado a través de norias, con una profundidad máxima de 10 m; los volúmenes de extracción en algunas de ellas llegan a $10 \text{ m}^3/\text{día}$. También existe bombeo de agua subterránea en 10 pozos profundos a caudales variables. La extracción conjunta de pozos y norias alcanza los $0.261 \text{ m}^3/\text{s}$. Superficialmente este acuífero está delimitado por el relieve volcánico que forma su área de recarga.

El modelo geológico aquí propuesto, y los valores del gradiente hidráulico, permiten decir que, en el intervalo de 80 a 500 m de profundidad, las planicies de Tecocomulco, Apan y Sahagún tienen continuidad hidráulica y constituyen un solo cuerpo de agua (acuífero), parcialmente dividido por numerosos aparatos volcánicos. Por otra parte, la falla Tláloc-Telapón que cruza la planicie de Tecocomulco en dirección NE-SW pone en comunicación las zonas de Tecocomulco y Apan. Sin embargo, a mayor profundidad estos acuíferos se separan por razones estructurales.

De productividad local limitada

En los pequeños valles de la parte sur y oriente de la zona, donde existen importantes espesores de tobas y conglomerados, y el espesor del aluvión es delgado, se almacenan solamente pequeños volúmenes de agua, pueden existir pequeñas surgencias temporales que hacen posible la existencia de cuerpos de agua superficial, de

los cuales se abastece la población rural. El aluvión sobreyace a rocas volcánicas y, en algunos valles, alcanza un espesor de 100 m.

Funcionamiento hidráulico. En esta unidad, la profundidad del nivel del agua varía de 2 a 100 m, siendo el descenso del agua hacia el noroeste en dirección de la planicie. Los parámetros hidráulicos se estimaron a partir de la extracción en norias muy someras y de un sólo pozo profundo, del cual únicamente se obtuvo el valor de T cuyo valor es $T = 58 \text{ m}^2/\text{día}$, en tanto que el de K se estima en $4.1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. El bombeo en esta unidad y las descargas de surgencias dan en conjunto un valor anual de $0.028 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este acuífero está limitado por interdigitación con el relieve volcánico y pasa transicionalmente al relleno de la planicie; las tobas que cubren la parte superior constituyen horizontes semipermeables. Las relaciones hidráulicas de este acuífero con sus homólogos, fisurado e intergranular son de tipo constante.

Acuitardo

Está constituido por sedimentos del tamaño de arcillas, limo-arcilla y limo-arena, piroclastos de caída libre (tobas, vidrio y ceniza volcánica), así como de materia orgánica y conchas de microfósiles (ostracodos y diatomeas). Su distribución está limitada al centro de la planicie, bajo condiciones lacustres. Estos sedimentos forman una unidad confinante para el acuífero intergranular que les subyace y hacen posible la existencia del lago de Tecocomulco.

Como se mencionó anteriormente, las características litoestratigráficas del acuitardo constan de una secuencia rítmica de sedimentos arcillo-limosos y arenas finas, arcillas que a profundidad se interstratifican con derrames de lava. El espesor del acuitardo puede llegar a 150 m en el centro de la planicie. Los datos geofísicos permiten suponer que esta secuencia se repite a diferentes profundidades.

Funcionamiento hidráulico. El gradiente hidráulico al interior del acuitardo es perceptible en su lado oeste, donde se presenta drenaje hacia el acuífero, influido por el bombeo de los pozos profundos. En las inmediaciones del lago, la profundidad del nivel del agua oscila en promedio de 0.40 m, hasta 4.6 m al año, a una distancia de un kilómetro de éste; el último valor se registra durante la época húmeda, lo que manifiesta que la recarga es lenta y se da durante la interfase húmeda-seca.

La medición de la resistividad (conductividad eléctrica) y temperatura del agua en dos piezómetros (Figura 1) indica que en el acuitardo el flujo subterráneo tiene la siguiente dinámica: entre 4 y 30 m de profundidad el flujo es casi horizontal con sensible movimiento ascendente, de 30 a 40 m hay flujo horizontal, de 40 a 60

m se detecta una combinación de flujo vertical descendente y horizontal, entre los 60 y 80 m se aprecia que el flujo es descendente. Después de esa profundidad es posible que el flujo sea de nuevo ascendente en relación con las condiciones confinadas del acuífero (Huizar-Álvarez *et al.*, 1998a).

Parámetros hidráulicos. Durante la realización de dos perforaciones se hicieron pruebas de inyección en los sedimentos lacustres cada 10 m. Los datos se interpretaron por el método de Hvorsley (1951) y Lefranc (1936), arrojando los siguientes valores promedio para la conductividad hidráulica: 10^{-4} m/s para las arenas y 10^{-7} m/s para las arcillas. En ese material se extrae agua en volumen promedio de $9 \text{ m}^3/\text{día}$.

El acuitardo tiene forma cóncava, en su interior se presentan algunos derrames de rocas volcánicas, y hacia las orillas está interdigitado con el material granular y fisurado que rodea la planicie.

Acuífero fisurado

Constituido por las rocas volcánicas básicas e intermedias que forman el relieve de esta subcuenca y que en la planicie se interdigitan con los sedimentos clásticos. El intenso fracturamiento que afecta a los derrames de lava incrementa su porosidad y su coeficiente de conductividad hidráulica. Con base en su productividad, este acuífero se subdivide en: 1) Extenso de productividad relativa media y 2) De Productividad discontinua limitada.

Extenso de productividad relativa (media)

Está caracterizado por basalto, andesita basáltica y andesita. El basalto se presenta en coladas de lava afectadas por fracturas o en brecha volcánica, mientras que las dos últimas litologías presentan una alta densidad de fracturas, a través de las cuales se percola el agua que alimenta el flujo subterráneo.

En este acuífero el nivel del agua es muy variable pues, cuando existen horizontes de depósitos piroclásticos que forman niveles semipermeables, se originan surgencias temporales o permanentes a diferentes alturas de la montaña; en otros casos las surgencias están en la base de la montaña. Lo anterior está muy relacionado con una de las cualidades del medio fisurado que es la predominancia de la conducción de un fluido sobre el almacenamiento. Esta propiedad explica la existencia de importantes descargas en el lado sur de la subcuenca, debido a la presencia de rocas semipermeables en la base del relieve. No así en el lado norte, donde el agua se percola a grandes profundidades, sin formar manantiales.

Funcionamiento hidráulico. Al pie de la montaña, el nivel del agua está a una profundidad promedio de 40 m, mientras que en la parte alta supera los 300 m. Los pozos que extraen agua de este acuífero se sitúan en la

base de la montaña y en ellos se detecta un gradiente hidráulico que desciende hacia la planicie y hacia el SW de la misma.

Los parámetros hidráulicos de este acuífero se evaluaron mediante ensayos de bombeo en dos pozos. El valor obtenido para la conductividad hidráulica es de 1.4×10^{-4} y $1,000 \text{ m}^2/\text{día}$ para la transmisividad.

En la parte oeste de la planicie, el acuitardo cubre a este acuífero originando condiciones hidráulicas semi-confinadas, mientras que en el resto de la planicie tiene condiciones libres. La descarga de agua subterránea a través de pozos es de $0.087 \text{ m}^3/\text{s}$ y en los manantiales es de $0.110 \text{ m}^3/\text{s}$

De productividad discontinua limitada

Constituido por rocas de composición química básica a ácida, afectadas por un intenso fracturamiento y parcialmente cubiertas por depósitos piroclásticos (tobas y lapilli), los cuales tienen hasta 10 m de espesor. La mayor extensión de este acuífero está en la parte meridional del área de estudio y su pequeña aportación de agua se manifiesta en pequeños manantiales asociados al intenso fracturamiento de la roca.

Este acuífero se interdigita con los sedimentos clásticos en el interior de la planicie y sus relaciones hidráulicas con el acuífero intergranular son de tipo constante.

Funcionamiento. En esta unidad el agua fluye a través de fracturas, al encontrar la presencia de sedimentos o rocas semipermeables origina pequeños manantiales, como los de Canoas, Huimiyucan y Graciano Sánchez, entre otros. En su defecto, el flujo continúa hacia mayor profundidad. Lo antes expuesto muestra que este acuífero también se comporta en buena parte como área de recarga. Por las descargas de los manantiales que varían entre 0.05 mL/s y 1.5 L/s , se estima para este acuífero un coeficiente de permeabilidad bajo, con valores de $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$.

Acuífero insignificante

Rocas o sedimentos sin agua subterránea o en poca cantidad para ser aprovechable

Comprende a las riolitas e ignimbritas que subyacen a importantes espesores de tobas pumicíticas-andesíticas que ocupan el sector oriental de la zona.

En esta litología, la ausencia de agua es casi completa, pues el carácter masivo y el escaso fracturamiento de las rocas influyen para que el agua fluya por superficie y en pequeñas fracturas. Por otra parte, la existencia de tobas muy compactas determina condiciones hidráulicas muy poco permeables.

La ausencia de vegetación coadyuva a la existencia de escurrimiento superficial, mismo que se infiltra al llegar a la planicie. No obstante, en las tobas existen dife-

rentes niveles de saturación temporal, que forman las descargas subterráneas, las cuales pueden ser asociadas a escurrimientos hipodérmicos temporales con gastos insignificantes. Se puede decir que este tipo de acuífero aporta una mínima parte de la recarga para el agua subterránea de la planicie

Las tobas poseen doble porosidad y el valor de su conductividad hidráulica, que se infiere por correlación con las arcillas del centro de la planicie, puede ser del orden de $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$.

Depósitos clásticos y piroclásticos semipermeables que cubren un acuífero intergranular o fisurado, de productividad variable

Corresponde a los materiales limo-arenosos, tobas arcillosas con diferente grado de compactación y abundantes horizontes de caliche intercalados en ellos. También incluye los flujos piroclásticos que forman la Loma de Ojuíla.

En general son sedimentos de textura fina, con diferente grado de compactación y espesores variables. La disponibilidad de agua en ellos es pequeña y cuando la tiene, la drenan de manera muy lenta hacia los acuíferos adyacentes principalmente en forma horizontal, o en superficie, de forma muy rápida. El poco contenido de agua y su granulometría permite asignarles un coeficiente de permeabilidad muy baja de $2 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

INVENTARIO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

La cuantificación de los recursos hídricos subterráneos se realizó con datos generados durante este estudio y con información proporcionada por los municipios. Los valores obtenidos en esa zona y sustituidos en la fórmula del balance de agua subterránea son los siguientes:

$$V_e - V_s = \pm \Delta v \quad (1)$$

donde:

V_e = volumen de entradas;

V_s = volumen de salidas;

Δv = variación del almacenamiento

$$V_e = V_{eh} + V_{rv} \quad (2)$$

donde:

V_{eh} = Volumen de flujo subterráneo que entra horizontalmente = $6,320,033 \text{ m}^3/\text{año}$ (a)

V_{rv} = Entradas verticales integradas por infiltración de lluvia y agua de retorno = $67,184,215 \text{ m}^3/\text{año}$ (a)

$$V_s = V_{sh} + V_{ss} + V_{sb} + V_{set} \quad (3)$$

donde:

V_{sh} = volumen de salidas flujo subterráneo horizontal

$$= 2,035,725 \text{ m}^3/\text{año (a);}$$

$$V_{ss} = \text{escurrimiento superficial}$$

$$= 6,098 \text{ m}^3/\text{año (b)}$$

$$V_{sb} = \text{Extracción por bombeo}$$

$$= 19,859,325 \text{ m}^3/\text{año (b, c)}$$

$$V_{set} = \text{Pérdidas por evapotranspiración}$$

$$= 51,220,000 \text{ m}^3/\text{año (a)}$$

Sustituyendo valores en (2) y (3) se tiene:

$$V_e = 6,320,333 + 67,184,215$$

$$V_e = 73,504,548 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$V_s = 2,035,725 + 6,098 + 19,859,325 + 51,220,000$$

$$V_s = 73,121,148 \text{ m}^3/\text{año}$$

De (1):

$$\Delta v = 73,504,548 - 73,121,148$$

$$\Delta v = 383,100 \text{ m}^3/\text{año}$$

(a): Calculado en este trabajo.

(b, c): Censos realizados en este trabajo e información de oficinas municipales y estatales encargadas del agua potable.

De este balance resulta que existe un pequeño excedente de agua, sin embargo, anteriormente se explicó que el nivel del agua en los pozos desciende en promedio 0.40 cm/año. Esto pareciera ser contradictorio, pero en realidad muestra que el excedente obtenido del cálculo es parte de la recarga para áreas adyacentes a Tecocomulco, pero sobre todo, es el que hace posible la existencia del Lago de Tecocomulco. De cualquier forma, resulta necesario conservar en el mejor equilibrio natural esta zona, pues aporta agua para la necesidad local y también aporta parte para las necesidades regionales.

CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Hasta antes del presente estudio, no existía un monitoreo sistemático de la mineralización y la bacteriología del agua subterránea en el área de Tecocomulco.

La temperatura del agua tiene una correspondencia con la temperatura del medio ambiente: 10 °C en manantiales y 20 °C en pozos. Los cationes y aniones presentes en el agua, en orden decreciente son: Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ y K^+ , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} , respectivamente.

Representando los resultados de los análisis químicos en el diagrama de Stiff (ver plano hidrogeológico anexo), se identifica la existencia de la facies hidroquímica bicarbonatada cálcica/magnésica, que al aproximarse la época húmeda presenta tendencias hacia la facies bicarbonatada sódica/cálcica en algunos sitios. Durante la época húmeda, en los sitios, 3, 6, 8, 13, 15, 19 aquí analizados, existen facies de mezcla.

La facies de agua cálcica/magnésica corresponde a la de un ambiente volcánico de composición básica a intermedia en donde, de acuerdo con Hem (1985), Appelo

y Postma (1993) y Huizar-Álvarez *et al.* (1998b), el calcio y el magnesio provienen de las plagioclasas.

La facies sódica contiene la mayor cantidad de sólidos disueltos y es característica de las norias situadas en el centro de la planicie, es decir en el acuitardo. Esto se relaciona con la existencia de sedimentos finos por donde el agua circula lentamente, dando tiempo a su mineralización, así mismo, la evaporación que afecta a esta parte de la cuenca coadyuva a la concentración de sales en el agua de forma similar a como suceden en otras partes de la Cuenca de México (Carrillo-Rivera *et al.*, 1998; Ortega-Guerrero *et al.*, 1997; Huizar-Álvarez *et al.*, 1998b).

En el diagrama de Stiff se muestran las características hidroquímicas del agua de la zona de recarga de esta región, donde los contenidos de sulfatos y cloruros corresponden a los aportados por la lluvia. Los valores de los índices Mg/Ca y Na/Cl fortalecen esta idea, además, ponen de manifiesto un cambio de bases en la planicie, donde el calcio y el magnesio se reflejan en la dureza del agua y determinan un valor máximo de 4.5 mg/L. Por su dureza, el agua es de buena a aceptable, indicado por valores de 0.6 mg/L a 4.5 mg/L.

El valor de la relación de adsorción del sodio (RAS) en el agua subterránea de Tecocomulco es menor a 1.0, su valor promedio es de 0.5. En los sitios donde la cantidad de sodio aumenta, el RAS alcanza valores máximos de 2.7, pero aún son pequeños, por lo que el agua de esta zona se puede emplear para irrigación sin riesgo alguno.

Los sólidos totales disueltos (STD) presentan dos rangos: 1) de 60 a 300 mg/L y 2) de 300 a 700 mg/L. El primero se asocia con rocas duras y con flujos de corta distancia, mientras que el segundo con rocas finas y flujo lento y de mayor longitud. Naturalmente, la distribución espacial de los STD y la C.E se correlacionan, al tiempo que indican la poca mineralización del agua en esta subcuenca. Así mismo, los valores bajos de STD corresponden a los sitios ubicados en la zona de recarga.

Lo arriba expuesto y la interpretación de los índices geoquímicos, manifiesta que la principal dirección del flujo subterráneo es de E-W (ver mapa hidrogeológico). De esta manera, mientras que el índice $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ disminuye hacia la planicie, la relación $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ aumenta, indicando así el flujo subterráneo y la mineralización del agua en esa dirección. La relación $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ también es mayor en la planicie. Sin embargo, existen pozos donde el valor de esta relación supera la unidad y, de acuerdo con Huizar-Álvarez y Mitre-Salazar (1998), ese valor indica indicios de contaminación.

Los nitratos y sulfatos están presentes en concentraciones pequeñas, pero los sitios 3, 10, 17, y 18 tienen importantes contenidos de estos aniones, cuyos valores máximos son 20, 55, 15 y 19 mg/L para nitratos y 62, 200, 72 y 100 mg/L para sulfatos respectivamente, manifestando con ello que hay problemas de contaminación antrópica asociada con aportes superficiales, que pueden

ser fuentes locales de agua residual, influencia de fosas sépticas y/o fertilizantes.

Esta situación se extrapola a varios de los aprovechamientos no considerados en este análisis y que tienen características hidrogeológicas similares. Un caso parecido se aprecia en la vecina subcuenca de Apan y con la cual se comunica. Los valores promedios de nitratos en la zona son 5 mg/L y de 15 mg/L para el sulfato.

Los elementos traza, presentan concentraciones que varían de un pozo a otro y se detectaron en el siguiente orden decreciente: Fe, Zn, Mn, Ni, Cu y Pb, cuyos valores medios son 0.08, 0.04, 0.031, 0.02, 0.01 y 0.001 mg/L respectivamente. De acuerdo con la norma NOM 127 de la Secretaría de Salud (1996) estos valores están por debajo de los límites permisibles para consumo humano y por lo tanto son aceptables.

El contenido de coliformes define dos tipos de agua en esta zona, una de calidad aceptable y otra de mala calidad. El número de bacterias varía de un sitio a otro pero, en casi todos, está permanentemente por arriba de la norma bacteriológica. (Secretaría de Salud 1996), con valores arriba de 80 por mL.

Los coliformes existentes son: *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes* y *Citrobacter freundii*. Su presencia en el agua subterránea, aún en mínima cantidad, manifiesta la existencia de contaminación. Estos microorganismos proceden de las heces fecales de animales y humanos, y son transportados por el aire y por el agua que se percola al subsuelo. El agua que contiene estos microorganismos es un agua con problemas para consumo humano, pues son causantes de diversas enfermedades infecciosas como diarrea y cólera entre otras (Sheris y Champoux *et al.*, 1990; Rodier, 1990; Morello *et al.*, 1984; Stanier *et al.*, 1986).

Con base en el contenido de coliformes, el agua de peor calidad corresponde a las norias, les siguen los pozos y después los manantiales. El contenido de bacterias presenta un patrón muy relacionado con la ubicación de los diferentes sitios respecto a la dirección del flujo de agua superficial y subterráneo, así como con la circulación local del aire en la zona.

De esta forma, las norias del centro de la planicie tienen la peor calidad de agua, pues además de no poseer protección sanitaria, hacia ellas fluye el agua sub-superficial, que en parte corresponde al agua residual de las viviendas que ahí existen.

Los pozos situados en el extremo noroeste de la planicie, que tampoco tienen protección sanitaria y cuyo bombeo induce el descenso de agua de superficie en forma más rápida, también tienen problemas de este tipo de contaminación. Algo similar sucede al agua de los manantiales, es decir, el contenido de bacterias en el agua de aquellos que están rodeados por población es mayor respecto de aquellos que están alejados de los mismos.

Lo anterior muestra que el agua que se consume en esta zona tiene un recorrido pequeño y de poca profundidad haciendo evidente la necesidad de proteger todos los

aprovechamientos de agua.

DIRECTRICES DE ACCIÓN EN RELACIÓN CON EL USO Y LA CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El cambio del uso de suelo forestal, de magueyes y de matorral, por el de agricultura, es el origen del fuerte proceso de erosión que afecta la subcuenca de Tecocomulco.

Aunado a lo anterior, el uso inadecuado del suelo está causando importantes efectos en el sistema hidrológico local, pues no sólo ocasiona la pérdida del suelo, sino que a su vez propicia el aumento del escurrimiento superficial y de la evapotranspiración. Lo anterior se traduce en una disminución del potencial de recarga para el acuífero local y los adyacentes pues, como se mencionó, esta subcuenca es un área de recarga a nivel regional.

Este lago ha sido y, aunque con muchas limitaciones, es todavía un magnífico hábitat natural para la fauna migratoria y sobre todo para la flora y fauna endémicas de este lugar, siendo además el último lago histórico de la Cuenca de México.

Todo esto hace imperativo y urgente emprender acciones hacia su preservación, que podrán evitar el cambio climático local y regional, así como hacer más sustentables los recursos agua, suelo y vegetación.

Un factor adicional aún no evaluado es el correspondiente a la aplicación de agroquímicos, en donde destacan los pesticidas, que significan un potencial muy importante de contaminación tanto para el agua superficial y subterránea, como para la fauna que temporalmente y de forma perenne habita en el lago de Tecocomulco. Esta fauna en su conjunto es de un valor inapreciable por lo que es imprescindible protegerla tanto como al agua.

Respecto a la calidad del agua, como se mencionó antes, en varios pozos y norias los contenidos de mesófilos y coliformes superan la norma de la Secretaría de Salud (1996), por lo que es necesaria la cloración del agua que abastece a la población para prevenir problemas de salud.

En lo relativo a la protección hacia la contaminación de los aprovechamientos de agua (noria, pozos y manantiales) es necesario se construyan conductos de drenaje para descargar el efluente lejos de las captaciones. Se recomienda que sea en lagunas de oxidación adecuadamente construidas.

Para el caso particular de los manantiales Alcantarillas y Huimiyucan, es necesario inclusive realizar un reordenamiento de las casas, ya que éstas se ubican justo encima de la zona de descarga. En su defecto, es urgente dotarles de drenaje para el agua residual, y conducir estas aguas a lagunas de oxidación. Esto debido a que las fosas sépticas que existen también contaminan el agua subterránea.

Los principales usos del agua en esta subcuenca

son doméstico y ganadero; la demanda local, aunque pequeña, muestra un sensible efecto en la evolución del nivel de agua.

CONCLUSIONES

La interpretación de los lineamientos locales y regionales en imagen LANDSAT, de la información de campo y de los estudios de magnetometría y gravimetría realizados durante esta investigación, muestra que el marco geológico de la zona de Tecocomulco consta de dos *graben*s comunicados y dispuestos, uno en orientación NE-SW y otro de NW-SE.

Estas depresiones quedan incluidas dentro de una depresión de mayores dimensiones interrumpida por numerosas manifestaciones volcánicas.

El modelo hidrogeológico de Tecocomulco se define por dos *graben*s que tienen un relleno de sedimentos aluviales y lacustres con un espesor promedio de 600 m. Después existen rocas volcánicas de diferente composición con espesores de 500 a 1,500 m. Finalmente sigue el basamento calcáreo.

Los derrames de lava que integran el relieve de superficie constituyen el área de recarga. La planicie forma la zona de descarga local, la cual se hace a través del bombeo de pozos.

Así mismo, por la estructura geológica regional, se interpreta que la región de Tecocomulco es una área de recarga hacia los acuíferos adyacentes de Sahagún y Apan.

En esta investigación también se muestra que la disposición y distribución de algunas de las unidades litológicas dentro del área de Tecocomulco es diferente a las descritas anteriormente por otros autores.

El sistema hidrogeológico comprende un acuífero intergranular, uno fisurado y un acuitardo. En el acuífero intergranular el nivel del agua varía 0.80 m/año, en respuesta al retardo de la recarga, misma que ocurre al final de época húmeda e inicios de la época seca. Los parámetros hidráulicos son: transmisividad (T) de 250 a 475 m²/día y conductividad hidráulica (K) de 2.64 a 4.3 x 10⁻⁴. En el acuífero fisurado, los valores para estos parámetros son K = 1.4 x 10⁻⁴ m/s y T = 1,000 m²/día, y determinan la existencia de varias e importantes descargas en la base de la montaña.

Respecto al acuitardo, entre 4 y 80 m de profundidad, el flujo subterráneo presenta las siguientes variaciones: en superficie es horizontal con sensible movimiento ascendente, después se detecta una combinación de flujo vertical descendente y flujo horizontal y finalmente el flujo es descendente. La conductividad hidráulica del acuitardo es de 2 x 10⁻⁷ m/s

Los nitratos y sulfatos están presentes en concentraciones relativamente bajas, pero sus valores manifiestan que hay problemas de contaminación antrópica aso-

ciada con fuentes superficiales locales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su reconocimiento a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGPA) por el financiamiento otorgado a través el del proyecto IN 107996. Un reconocimiento amplio al Geógrafo José Ruiz González, quien apoyó en el trabajo de campo y en la elaboración de dibujos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alatríste-Vilchis, D.R., 1999, Determinación de la estructura subsuperficial de la subcuenca de Tecocomulco, Estado de Hidalgo, empleando técnicas geofísicas: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Maestría, 89 p. (inérita)
- American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation (APHA-WWA-WPCF), 1994, 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, 70 p.
- Appelo, C.A.J., y Potsma, D., 1993, Geochemistry groundwater and pollution: Rotterdam, Brookfield, A.A. Balkema, 537 p.
- Birkle, P., Torres-Rodríguez, V., and González-Partida, E., 1996, Effects of evapotranspiration on the water balance of the Valley of Mexico: Geofísica Internacional, v. 35, núm. 1, p.63-73.
- Blázquez, L., 1956, Geohidrología de la Cuenca de México: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología 77 p. (inérito).
- Bloomfield, K., 1975, A late quaternary monogenetic volcano field in central Mexico: Geologische Rundschau, v. 64, núm. 2, p. 476-497.
- Carrillo-Rivera, J.J.; Cardona-Benavides, A.; Edmunds, W.M., and Mooser, F., 1998, Induced vertical upward flow in Mexico City. In: Proceedings of the International Groundwater Conference: Melbourne, Australia, International Association of Hydrologists, p. 111-116.
- Castro-García, A., y Córdoba-Méndez, D., 1994, Estratigrafía del área volcánica de Tulancingo, Hidalgo, México: Pachuca, Hidalgo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, p. 26-39
- Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1970-1987, Boletín de mecánica de suelos. Datos del Valle de México, periodo 1970: México, D.F. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, núms. 7-10.
- Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1975-1990, Boletín hidrológico. Datos estadísticos: México, D.F., Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, núms. 25-40, p. 1,973- 1,988.
- Cooper, H.H., y Jacob, C.E., 1946, A generalized graphic method for evaluating formation constants and summarizing well field history: Transactions of the American Geophysical Union, v. 27, núm. 4, p. 526-534.
- Cooper, H.H.; Bredehoeft, J.D., y Papadopulos, I.S., 1967, Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water: Water Resources Research, v. 3, núm.1, p. 263-269.
- Coutagne, A., 1954, Etude de quelques corrélations hydrométéorologiques régionales et de leur interprétation algébrique: Paris, Société Hydrotechnique de France, p. 220-226.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de Interpretación: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 2, núm. 2, p. 172- 187.
- Hem, J.D., 1985, Study and interpretation of the chemical character-

- tics of natural water: U.S Geological Survey, Water-Supply Paper, núm. 2254, 263 p.
- Huizar-Álvarez, R., y Mitre-Salazar, L. M., 1998, Hydrochemistry of the Chalco Basin, Mexico. An Overview. In: Proceeding of the International Groundwater Conference: Melbourne, Australia, International Association of Hydrologists, p. 163-168.
- , Campos-Enríquez, J.O.; Lermo-Samaniego, O.; Delgado-Rodríguez, O. y González, H., 1997, Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basin of Apan and Tohac (Mexico basin): Geofísica. Internacional, v.36, núm. 4, p. 217–233.
- , Miroslav, K., Mitre-Salazar, L.M., Campos-Enríquez, J.O., Alatríste-Vilchis, D.R., 1998a, Investigaciones hidrogeológicas en la subcuenca de Tecocomulco, Estado de Hidalgo, México, in 4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, Memoria: Montevideo, Uruguay, núm. 3, p. 1,315-1,322.
- , Méndez-García, T., y Madrid-Ríos, R., 1998b, Patterns of groundwater hydrochemistry in Apan-Tohac subbasin, Mexico—Hydrological Sciences: Journal des Sciences Hydrologiques, v. 43, núm.5, p. 669-685.
- Hvorsley, M.J., 1951, Time lag and Soil Permeability in groundwater Observations: U.S. Army Corp of Engineers, Waterways Experiments Station, Bulletin, núm. 36, 49 p.
- Ledezma-Guerrero, O., 1987, Hoja Calpulalpan 14Q-h(3), con resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, estados de Hidalgo, México y Tlaxcala: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta Geológicas de México, Serie de 1: 100,000, mapa con secciones y texto, 12 p.
- Lefranc, E., 1936, Procédé de mesure de la perméabilité des sols dans les nappes aquifères et application au calcul du débit des puits: Paris, Génie Civil. CIX, 15.
- López-Hernandez, A., y Castillo, H.D., 1997, Exploratory drilling at Acoculco, Puebla, Mexico: a hydrothermal system with only nonthermal manifestations: Geothermal Resources Council Transaction, v.21, p. 429-433.
- Marín-Córdova, S., Torres-Ruata, J.C., y Lugo, P. F., 1990, Carta hidrogeológica de la República Mexicana, esc. 1:4,000,000. En: Atlas Nacional de México, (Naturaleza. IV 6.3): México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, v. 1.
- Mooser, F., 1975, Historia geológica de la Cuenca de México. En: Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal: México, D.F., Departamento del Distrito Federal, v. 1, p. 7-38, 1 mapa geológico.
- Mooser, F., Nair, A.E.M., y Negendank, J.F.W., 1974, Paleomagnetic Investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks: VIII. A paleomagnetic and petrologic study of volcanics of the Valley of Mexico: Geologische Rundschau, v. 63, núm. 1, 2, p. 451-483
- Morello, J.A., Mizer, E.H., y Wilson, M.E., 1984, Microbiology in patient care: 4a edición, New York, MacMillan, 762 p.
- Negendank, J.F.W., 1972, Volcanics of the Valley of Mexico. Description of some mexican volcanic rocks with special consideration of the opaques. Part I: Petrography of the volcanics: Neues Jahrbuch fuer Mineralogie, Abhandlungen, v. 116, núm. 3, p. 308-320.
- Ortega-Guerrero, M.A., Cherry, A.J., y Aravena, R., 1997, Origin of pore water and salinity in the lacustrine aquitard overlaying the regional aquifer of Mexico city: Journal of Hydrology, v. 97, núm. 1-4, p. 47-69.
- Robin, C., 1976, Las series volcánicas de la Sierra Madre Oriental (basaltos e ignimbritas). Descripción y caracteres químicos: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma México, Instituto de Geología, Revista, núm. 2, p.13-42.
- Robin, C., 1978, Particularités géochimiques des suites andésitiques de la zone orientale de l' Axe Transmexicain, dans leur contexte tectonique: Bulletin de la Societe Geologique de France, 7eme serie, v. 20, núm. 2, p. 193-202.
- Rodier J.M., 1990, Análisis de las aguas. Aguas naturales, aguas residuales, aguas de mar: Barcelona, Omega, 1,059 p.
- Sherris, J., y Champoux, J.J., eds., 1990, Medical Microbiology, an introduction to infectious diseases: Amsterdam, Elsevier, 991 p.
- Secretaría del Medio Ambiente, 1998, Estudio del control de la calidad del agua subterránea extraída en la subcuenca de México (Delegación Iztapalapa, D.F): México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Contrato N. CON04-98, 150 p.
- Secretaría de Salud (SS), 1996, Norma Oficial Mexicana; NOM. 127, SSA, salud ambiental, agua para uso y consumo humano: México, D.F., Secretaría de Gobernación, Diario Oficial, 1. Enero, sec. 1. p 40-50.
- Stanier, R.Y., Adelberg, Edward A., and Ingraham, J.L., 1986, Microbiología: México, D.F., Repla, 836 p.
- Stiff. H.A., 1951, The interpretation of chemical water analysis by means of patterns: Journal of Petroleum Technology, v. 3, núm. 10, p.15-17.
- Struckmeier, W. F., y Margat, J., 1995, Hydrogeological Maps: a guide and standard legend: Hannover, Verlag-Heinz Hiese, 167 p.
- Suter, M., 1990, Hoja Tamazunchale 14Q-e(5) con geología de la hoja Tamazunchale, estados de Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México, serie 1:100,000, 1 mapa con texto, 55 p..
- Talwani, M., Worzel, J.L., y Landisman, M.G., 1959, Rapid gravity computations for two dimensional fracture bodies with applications to the Mendocino submarine fracture zone: Journal of Geophysical Research, v. 64, p. 49-59.
- Thies, C.V., 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage: Transactions of the American Geophysical Union, v. 16, p. 519-524.
- Thiessen, A.H., 1911, Precipitations averages for large areas: Monthly Weather Review, juillet, 108 p.
- Turc, L., 1954, Le bilan d' eau des sols; realtions 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.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA), 1984, Methods for chemical analysis of water and waste water: Washington, D.C., Environmental Protection Agency, núm. 16 74000.
- UNESCO, 1983, International legend for hydrogeological maps., revised edition: Paris, Francia, UNESCO, Technical Document SC- 4/WS/7, 51 p.

CARTOGRAFÍA DE APOYO

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1979, Ciudad Sahagún E14-B12, carta topográfica, escala 1:50,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1983, Chignahuapan E14-B13, carta topográfica, escala 1:50,000: México. D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.

Manuscrito recibido: Enero 28, 2000

Manuscrito corregido recibido: Diciembre 18, 2000

Manuscrito aceptado: Enero 15, 2001