

Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central

**Luis E. Lesser-Carrillo^{1,*}, Juan M. Lesser-Illades¹,
Santiago Arellano-Islas² y David González-Posadas¹**

¹ Lesser y Asociados S.A. de C.V., Río Guadalquivir #3, Col. Pathé, 76020 Querétaro, Querétaro, México.

² Comisión Estatal de Agua y Alcantarillado del Estado de Hidalgo, Emilio Carranza #101, Col. Carlos Robirosa, 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

* luis_lesser@prodigy.net.mx

RESUMEN

Un aspecto relevante en el valle del Mezquital es que recibe aproximadamente 50 m³/s de agua residual no tratada proveniente de la Ciudad de México, a través del Gran Canal del Desagüe, el Interceptor Poniente y el Emisor Central. Esta agua se utiliza para el riego de alrededor de 45214 ha y parte se infiltra al acuífero. El 81% de los canales principales y el 52% de los canales laterales no se encuentran revestidos, permitiendo la infiltración y recarga del agua residual directamente al acuífero. Se realizó un estudio geohidrológico de actualización en el acuífero del valle del Mezquital mediante el cual se diferenciaron dos horizontes acuíferos que no se habían detectado en estudios previos, uno superficial y otro profundo. Como resultado del balance de aguas subterráneas, se encontró que la principal entrada de agua al acuífero del valle del Mezquital corresponde a la infiltración de las aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México, a través de canales y retornos de riego. Las salidas de agua del acuífero se llevan a cabo a través de manantiales que descargan al río Tula. Otra parte es extraída por pozos y el resto descarga hacia el norte y noreste, tanto en forma superficial (drenado por el río Salado), como subterránea. Durante el año 2007 se observaron profundidades entre 10 y 40 m para el nivel estático, con un flujo de agua subterránea de sur a norte. Se calculó un balance del agua subterránea obteniéndose que las entradas subterráneas son de 10.6 Mm³/año, la infiltración es de 165 Mm³/año, la extracción alcanza 97.7 Mm³/año, las salidas subterráneas equivalen a 71.7 Mm³/año, el cambio de almacenamiento es cero y la evapotranspiración es de 6.1 Mm³/año. En cuanto a calidad del agua se determinó que en los 65 pozos analizados químicamente, el sodio y los sólidos totales disueltos generalmente se encuentran por arriba del límite máximo permisible para agua de uso y consumo humano. También en varios pozos se detectaron arsénico, fluoruros y plomo en concentraciones que superan el límite máximo permisible. En treinta de los 75 pozos de agua potable analizados bacteriológicamente, se detectaron coliformes totales y en varios de ellos coliformes fecales.

Palabras clave: Mezquital, acuífero, balance, agua subterránea, contaminación, geoquímica.

ABSTRACT

A significant aspect of the Mezquital valley is that it receives approximately 50 m³/s of untreated wastewater from Mexico City. The sewage flows through drains such as the Gran Canal del Desagüe, Interceptor Poniente and the Emisor Central. This untreated wastewater is used for irrigation of

aproximadamente 45214 ha, and a portion infiltrates to the aquifer. 81% of the main channels and 52% of the lateral channels are unlined and therefore wastewater recharges directly the aquifer. Two previously undifferentiated aquifers were now detected by means of a hydrogeologic study in the Mezquital valley. Both, a shallow and a deep aquifers, may be interconnected in some points, and in others they may be isolated. As a result from the groundwater balance, it was determined that the main recharge to the Mezquital valley aquifer is the infiltration of untreated wastewater from Mexico City through channels and irrigation returns. Aquifer discharge occurs through springs that discharge into the Tula river. Another portion of the discharge is withdrawn by wells, and the remainder discharges to the north and northeast as surface water drained by the río Salado, and as groundwater flow. During 2007 the static water level reached depths between 10 and 40 m with groundwater flow from south to north. A groundwater balance was performed obtaining 10.6 Mm³/yr as groundwater recharge, 165 Mm³/yr as vertical infiltration to the aquifer, 97.7 Mm³/yr withdrawn by pumping, 71.7 Mm³/yr as groundwater discharge, zero for change in storage and 6.1 Mm³/yr as evapotranspiration. In terms of water quality, most of the 65 chemically analyzed wells were found with sodium and total dissolved solids concentrations above the maximum permissible limit in water for human consumption. In some wells, arsenic, fluoride, and lead have concentrations that exceed the permissible limit. In thirty out of 75 bacteriologically analyzed drinking water wells, total coliforms were detected and several had fecal coliforms.

Keywords: Mezquital, aquifer, balance, groundwater, contamination, geochemistry.

INTRODUCCIÓN

Originalmente, el valle del Mezquital era una zona semiárida. Hace casi un siglo las aguas residuales de la Ciudad de México empezaron a ser descargadas y utilizadas, sin tratar, para el riego del valle del Mezquital, provocando que parte de esta agua se infiltrara y recargara al acuífero, aspecto por el cual este valle ha sido estudiado ampliamente (Jiménez y Chávez, 2004; Friedel *et al.*, 2000; Marín *et al.*, 1998). La zona de estudio se localiza en la porción central-sur del estado de Hidalgo y en el límite con el estado de México. Geográficamente se encuentra entre los paralelos 19°30' y 20°22' de latitud norte y entre los meridianos 98°56' y 99°37' de longitud oeste (Figura 1).

Existen estudios que se han enfocado al grado de contaminación de los suelos del valle del Mezquital irrigados con las aguas residuales (Huerta *et al.*, 2002; Reyes Solís *et al.*, 2009). Cajuste *et al.* (1991) y Flores *et al.* (1997) estudiaron la absorción de metales por el subsuelo proveniente del agua residual descargada en el valle del Mezquital, encontrando contaminación por metales en sedimentos y plantas en las zonas irrigadas. En contraste, Friedel *et al.* (2000) y Ramírez-Fuentes *et al.* (2002) no detectan gran impacto de metales en muestras de sedimentos, sin embargo advierten que en 30 años más podrán existir problemas de contaminación de metales en plantas. Otros estudios han encontrado ya evidencias de contaminación en el agua subterránea (Marín *et al.*, 1998). Gallegos *et al.* (1999) encontraron contaminación orgánica (nitratos y coliformes fecales y totales) en muestras de agua subterránea en el valle del Mezquital, especialmente en las muestras someras. Jiménez y Chávez (2004) detectaron que existe un evidente proceso de purificación del agua residual recargada y concluyen que los suelos del valle del Mezquital tienen la capacidad para tratar el agua residual y puede producir una

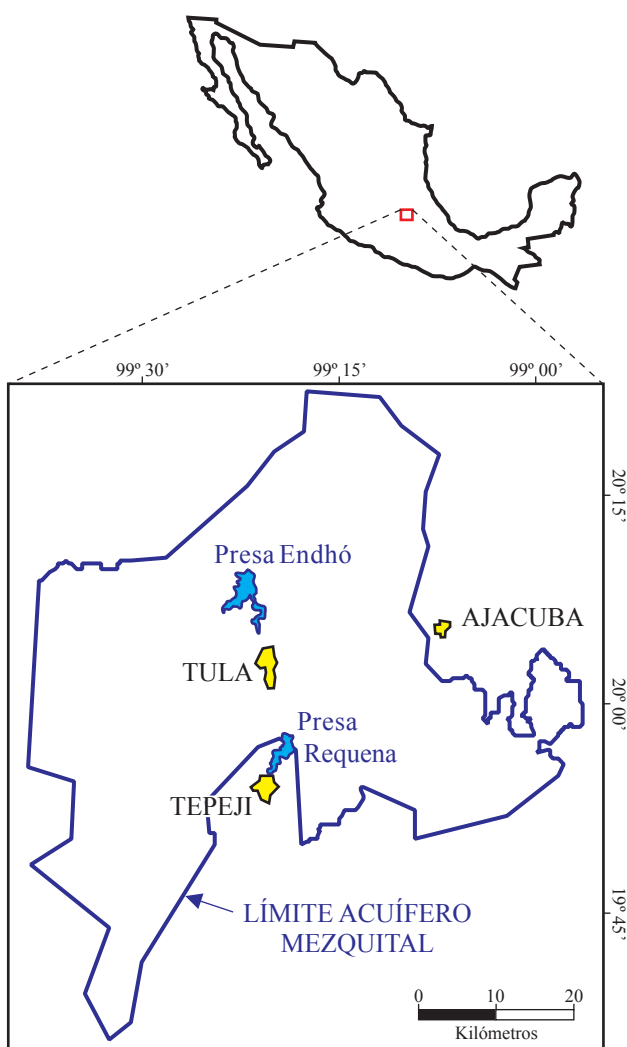


Figura 1. Localización de la zona estudiada y límite del acuífero del valle del Mezquital.

calidad aceptable para consumo. Contrario a esto, Page *et al.* (2010) realizaron un estudio de riesgo microbiológico y concluyen que el riesgo de contaminación del acuífero es alto debido a la falta de un pretratamiento del agua residual recargada y al poco tiempo de residencia del agua descargada al acuífero. Otros estudios relativos a la contaminación en el acuífero del valle del Mezquital incluyen el estudio del riesgo a la exposición del agua subterránea contaminada (Downs *et al.*, 1999). También se ha estudiado el impacto de la recarga de agua residual en la abundancia de esporas en los sedimentos contaminados (Ortega-Larrocea *et al.*, 2001; Ortega-Larrocea *et al.*, 2007) e incluso se ha estudiado la cantidad de metales en leche de vacas que se alimentan con pastura irrigada con las aguas residuales en el valle del Mezquital (Solís *et al.*, 2009). Estudios recientes se han enfocado en la caracterización de compuestos farmacéuticos en los sedimentos y agua subterránea del acuífero del valle del Mezquital (Siemens *et al.*, 2008; Daughton y Ruhoy, 2009). En la revisión de literatura citada anteriormente se detecta un debate acerca del impacto potencial de contaminación del acuífero proveniente de la recarga de agua residual. Por esta razón es necesario presentar una caracterización actualizada del funcionamiento geohidrológico del acuífero del valle del Mezquital. Por esto, los objetivos principales del presente estudio son:

1) Determinar el estado actual del acuífero en términos dinámicos y realizar un balance hídrico del mismo, con valores actualizados de entradas y salidas de agua del acuífero. Estudiar el efecto hidráulico de la recarga por retornos de riego e infiltración por canales, así como la importancia de su aportación al balance de agua del acuífero.

2) Determinar la calidad del agua del acuífero del valle del Mezquital y el efecto de la recarga de agua residual no tratada por medio de retornos de riego e infiltración de canales.

METODOLOGÍA

Se realizó una revisión de la hidrología superficial, geología y geohidrología de la zona con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de la Comisión Estatal de Agua y de Alcantarillado del Estado de Hidalgo (CEAAEH). Entre los estudios consultados se encuentran Ariel Consultores (1999), Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1967), Comisión Nacional del Agua (2002), Departamento de Geohidrología de la Comisión Federal de Electricidad (1996), Geocalli, S.A. (1981), Hidrotec, S.A. (1969), Organización Internacional de Energía Atómica (1975) y Pecten S.A. de C.V. (1994). Esta revisión bibliográfica tuvo la finalidad de consolidar la información geológica existente en un solo marco conceptual, con énfasis en la definición de las formaciones que pueden dar origen a las zonas acuíferas. Se realizó en campo un censo de 456 aprovechamientos de agua subterránea del acuífero valle del Mezquital actualizado hasta el año

de 2007, una nivelación de brocales de 51 pozos utilizados como piloto para piezometría (Figura 2) y 34 pruebas de bombeo (Kruseman y Ridder, 1994) que fueron interpretadas usando el programa *Ground Water for Windows*. Para caracterizar la calidad del agua del acuífero se realizaron análisis físico-químicos en 65 aprovechamientos, así como 75 análisis bacteriológicos en pozos de agua potable. Todas las muestras fueron analizadas en laboratorios acreditados por la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA).

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

Un aspecto relevante de la zona de estudio es que la Ciudad de México drena sus aguas residuales hacia el valle del Mezquital a través de los llamados Gran Canal del Desagüe, Interceptor Poniente y Emisor Central. Los dos primeros cruzan la divisoria entre las cuencas de México y Mezquital a través de los túneles de Tequisquiac y el tajo

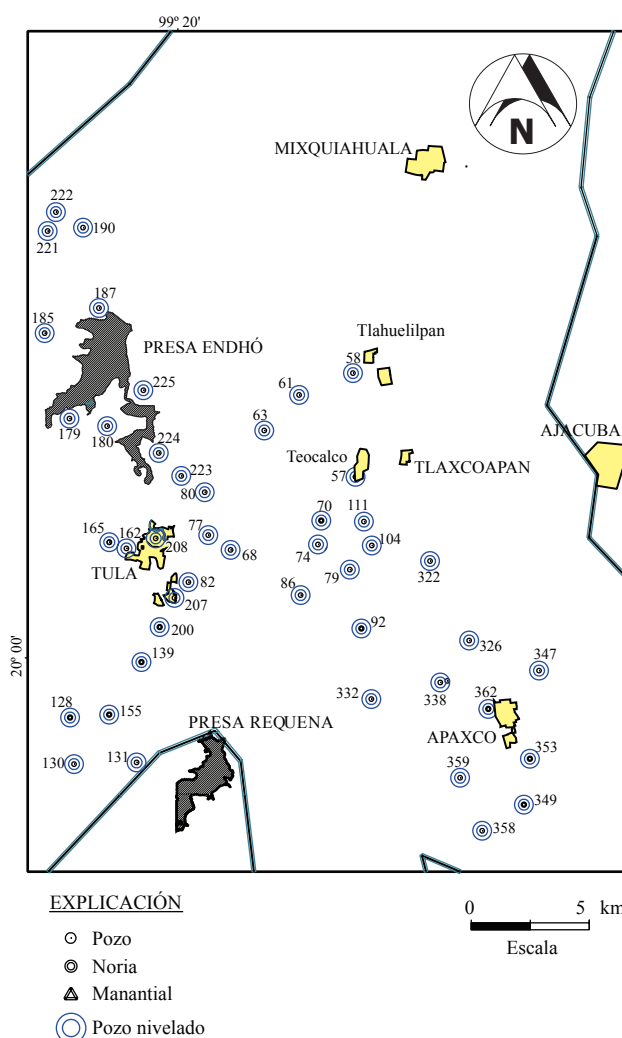


Figura 2. Localización de aprovechamientos censados y nivelados en este trabajo.

de Nochistongo, para incorporarse a los ríos Salado y El Salto respectivamente (Figura 3). El río El Salto descarga en la presa Requena, de donde continúa como el río Tula circulando hacia el norte. Actualmente la zona recibe aproximadamente 50 m³/s de agua residual no tratada para el riego de alrededor de 45214 ha (CONAGUA, 1998). Ésta es distribuida para riego mediante los canales principales de El Salto-Tlmalco, canal de Fuerza, canal Dendhó, canal Endhó y canal Requena. El ochenta y uno por ciento de los canales principales y el 52% de los canales laterales no se encuentran revestidos y el agua residual recarga directamente al acuífero (CONAGUA, 1998).

GEOLOGÍA

El valle del Mezquital es una planicie con ligera pendiente que desciende hacia el norte, limitada por elevaciones topográficas que son en su mayoría conos volcánicos y productos asociados. El valle está constituido por una alternancia de material piroclástico, lava y sedimentos lacustres conocidos como Formación Tarango del Paleógeno, que se encuentran cubiertos por una delgada capa de aluvión del Cuaternario. Las sierras que bordean el valle del Mezquital están formadas por rocas volcánicas, principalmente lava y en menor proporción toba del Paleógeno. La sierra al norte

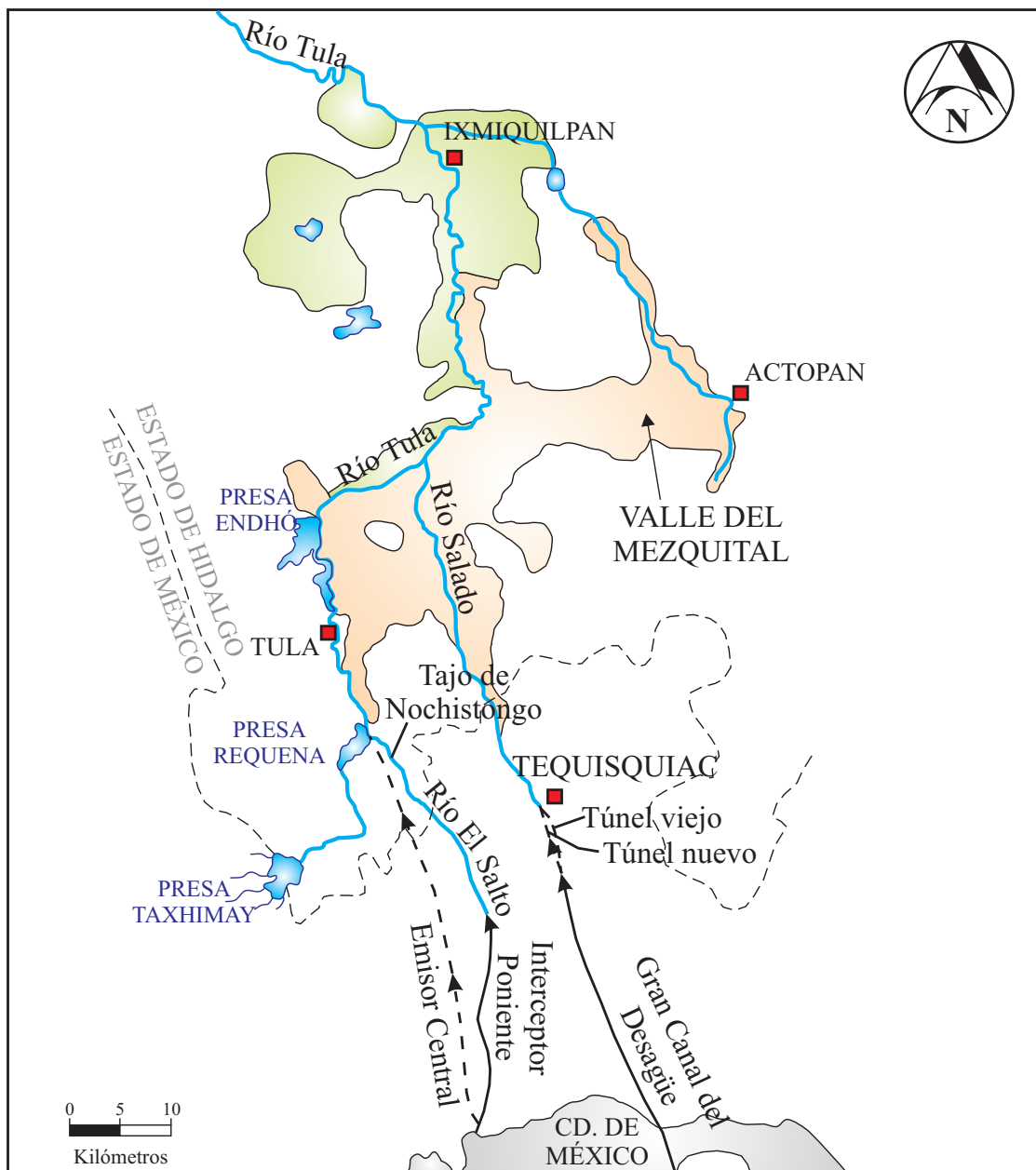


Figura 3. Flujo de las descargas de aguas negras de la Ciudad de México hacia el valle del Mezquital.

del valle del Mezquital y algunos puntos de Bomintzhá, están constituidos por sedimentos marinos calcáreos del Cretácico. Basados en INEGI (1983a), INEGI (1983b), SGM (1997), SGM (2002) y (Mooser *et al.*, 1996), se formó la sección de la Figura 4 que ilustra los materiales que conforman el subsuelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geohidrología

En el valle del Mezquital, el subsuelo se encuentra constituido por aluviones intercalados con sedimentos lacustres y coladas de basalto (Figura 4). Se llevaron a cabo 34 pruebas de bombeo (Kruseman y Ridder, 1994) que fueron interpretadas usando el programa *Ground Water for Windows*. La mayor parte presenta valores de transmisibilidad de alrededor de $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Algunos pozos aislados ubicados junto a la presa Endhó, tienen transmisibilidades mayores de $100 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, por encontrarse en rocas basálticas (Figura 5). Con base en los datos del censo, se elaboró la configuración de la profundidad del nivel estático para el año 2007 (Figura 6), en la cual se observan curvas entre 10 y 40 m de profundidad. Respecto a la configuración de la elevación del nivel estático para el

año 2007 (Figura 7), se presentan curvas de 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm) al sur de Apaxco, las cuales disminuyen paulatinamente en dirección al norte hasta los 1980 msnm, a la altura de Santiago Acayutlán, indicando un flujo subterráneo de sur a norte. Mediante la piezometría se diferenciaron dos horizontes acuíferos. Uno con un nivel estático somero (7-8 m) y otro con nivel a mayor profundidad (40-50 m). Ejemplos de dichos horizontes acuíferos se pueden observar en los pozos MZ-47 y MZ-48, que tienen profundidades del nivel estático de 7 y 8 m respectivamente. Muy cerca de éstos, se encuentran los pozos MZ-58 y MZ-59 con profundidades de 42 y 51 m respectivamente, los cuales pertenecen al nivel del acuífero profundo (Figura 8). Una situación similar se encuentra en los pozos MZ-116 y MZ-443, que presentan valores someros, mientras que los pozos MZ-56 y MZ-57, muy cercanos a ellos, presentan valores del acuífero profundo. Lo mismo pasa para los pozos MZ-67 (nivel somero) y MZ-74 (nivel profundo). Muchos de los pozos atraviesan ambos horizontes acuíferos y presentan el nivel somero. Otras captaciones incluyen ademe liso y cementado en su parte superior, por lo que manifiestan exclusivamente el nivel del acuífero inferior o profundo. La recarga de estos horizontes acuíferos se lleva a cabo mediante flujo subterráneo procedente del sur y de infiltración sobre el valle del Mezquital, a partir de retornos de riego y pérdidas en canales. El agua subterránea fluye

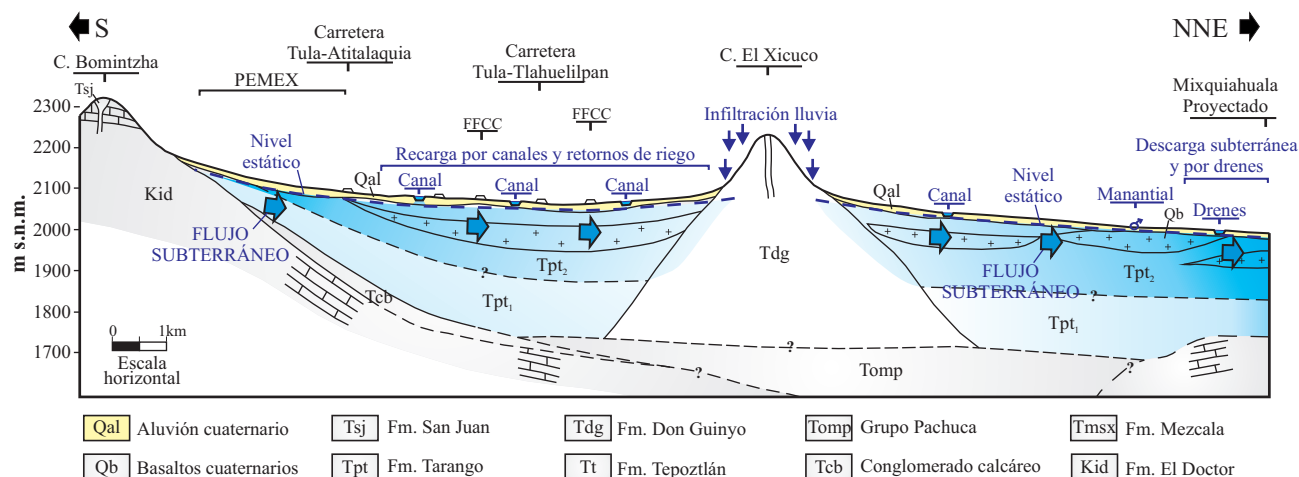
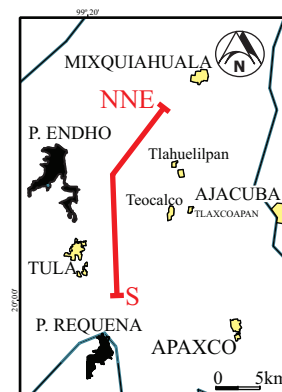


Figura 4. Sección geológica/geohidrológica del valle del Mezquital. Se muestran las principales formaciones y el flujo regional del acuífero principal (acuífero somero), que es de sur a norte.



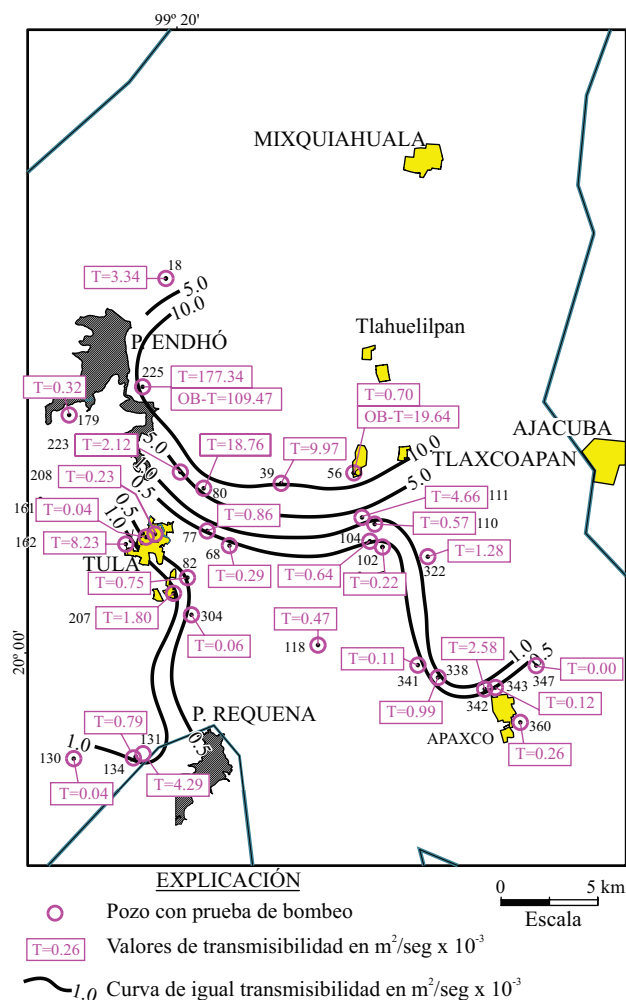


Figura 5. Valores de transmisibilidad del acuífero, calculados de pruebas de bombeo en este estudio.

hacia el norte y descarga por drenado al río Tula y salidas subterráneas. Los grandes volúmenes utilizados para riego provocan que, en la parte norte del acuífero, el nivel se haya elevado sobre la superficie del terreno y provoque zonas de inundación que se desaguan a través de drenes artificiales.

Balance del acuífero

Se estableció la ecuación de balance volumétrico del acuífero, en la cual las entradas de agua subterráneas E menos las salidas S son iguales al cambio de almacenamiento ΔS . Las entradas E corresponden a la recarga por flujo subterráneo E_s y a la infiltración Inf . Las salidas S se dividen en el flujo subterráneo que sale del sistema acuífero hacia el norte S_s , las pérdidas por evapotranspiración Evp y la extracción a través de pozos y descarga de manantiales dentro de la zona de balance Ext .

Se trazaron celdas para el cálculo del flujo subterráneo utilizando la configuración de la elevación del nivel estático. En cada una de las celdas se aplicó la Ley de Darcy (Fetter,

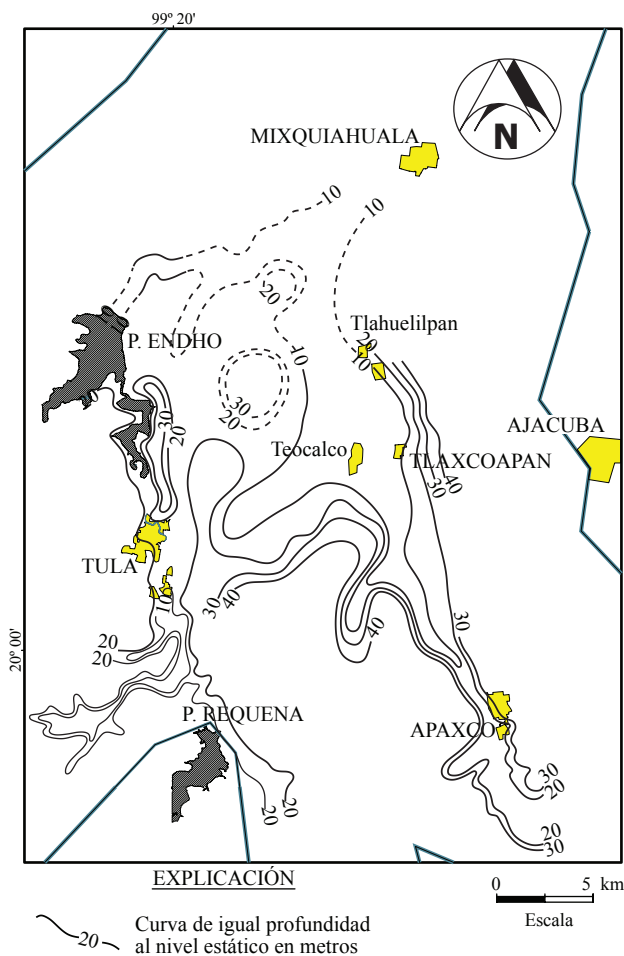


Figura 6. Profundidad al nivel estático (2007). Datos de este estudio.

1994) para obtener la cantidad de agua que fluye a través de ellas, la cual es igual a: $Q = TBi$, donde T es la transmisibilidad (m^2/s) (tomada de la Figura 5); B es el largo de las celdas (m); i es el gradiente hidráulico (adimensional) (tomada de la Figura 7). El volumen calculado de entrada por flujo subterráneo E_s es de $10.593 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Las salidas subterráneas S_s se calcularon en $71.747 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Se calculó la extracción del agua subterránea a partir de los datos del censo de aprovechamientos realizado en este estudio. Se consideraron solo aquellos aprovechamientos (pozos, norias y manantiales) ubicados dentro de la zona de balance, la cual cubre una superficie de 287.2 km^2 . La extracción calculada Ext ascendió a $97.7 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Se estimó, para efectos de cálculo, que el nivel estático no ha presentado cambios y por lo tanto se consideró un cambio de almacenamiento ΔS de cero. La evapotranspiración se calculó mediante dos métodos: el de Turc (1961) y el de Coutagne (Birkle et al., 1998). La fórmula de Turc es:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + (P/L)^2}} \quad (1)$$

donde:

ETR = Evapotranspiración en $\text{mm}/\text{año}$; P = Precipitación en $\text{mm}/\text{año}$.

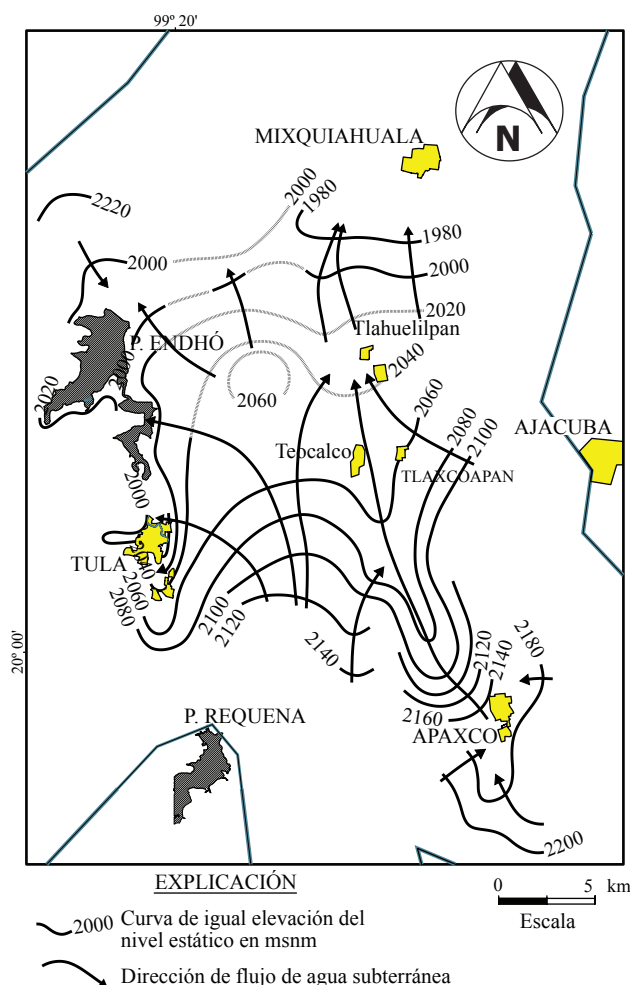


Figura 7. Elevación del nivel estático (2007). Datos de este estudio.

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (2)$$

donde: T = Temperatura en $^{\circ}\text{C}$.

Para el caso del método de Coutagne:

$$ETR = P - P^2 \lambda \quad (3)$$

donde:

$$\lambda = \frac{1}{0.8 + 0.14t} \quad (4)$$

Se utilizó una temperatura (t) de 17°C y una precipitación de 546 mm/año . Para el caso de la fórmula de Turc, la evapotranspiración resultó en 495 mm y para el caso de Coutagne en 452 mm/año , por lo que se utilizó un valor promedio para la evapotranspiración de 473 mm/año . De acuerdo a los estudios de cálculo de la disponibilidad de agua subterránea de varios acuíferos (CONAGUA, 2009), cuando el nivel se encuentra a 5 m de profundidad, el efecto de evapotranspiración se reduce al 50% y cuando se encuentra cerca de la superficie es del 100% . En el área central-norte del valle del Mezquital, el nivel estático se encuentra entre 0 y 5 m , por lo que se consideró que la evapotranspiración corresponde al 75% del valor promedio obtenido, es decir 355 mm . El área donde el nivel estático

se encuentra entre 0 y 5 metros de profundidad es de 17.2 km^2 , que multiplicados por los 355 mm da un volumen de evapotranspiración E_{vp} de $6.1\text{ Mm}^3/\text{año}$.

La infiltración Inf se dedujo de la ecuación de balance, donde:

$$Inf = Ss + Ext + E_{vp} - E_s \quad (5)$$

Sustituyendo los valores ya determinados se obtiene una $Inf = 165\text{ Mm}^3/\text{año}$.

Hidrogeoquímica y calidad del agua

Se realizaron análisis físico-químicos en 65 aprovechamientos (Figura 9). Los resultados fueron comparados con los límites permisibles (LP) para agua de uso y consumo humano, establecidos en la norma oficial NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000), y se determinó que el Na y los sólidos totales disueltos (SDT) generalmente se encuentran por arriba del LP (Tabla 1). En relación a las determinaciones de elementos químicos, se detectó arsénico en siete aprovechamientos localizados al sur de Tlaxcoapan (Figura 9). La mitad de los sitios analizados presentan fluoruros por arriba de la norma, y respecto al plomo, la mayoría superan el límite máximo permisible. Los fosfatos y el boro también se presentan en concentraciones altas en muchas de las muestras (Tabla 2). Los STD en las muestras de agua analizadas se encuentran con concentraciones entre 196 y 300 mg/l de STD en el extremo sur del área de estudio (Figura 10). En el extremo norte, alrededor de Xochitlán, los aprovechamientos MZ-27 y MZ-31 presentan menos de 800 mg/l y los cuatro aprovechamientos restantes tienen entre 1060 y 1224 mg/l . En la parte central del valle del Mezquital, la mayor parte de los aprovechamientos analizados presentan poco más de 1000 mg/l de STD y únicamente el pozo MZ-103 presentó una concentración

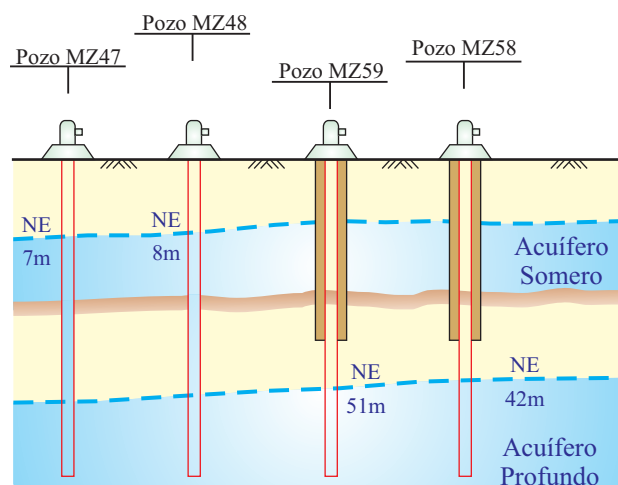


Figura 8. Esquema de diferenciación de los horizontes acuíferos del valle del Mezquital.

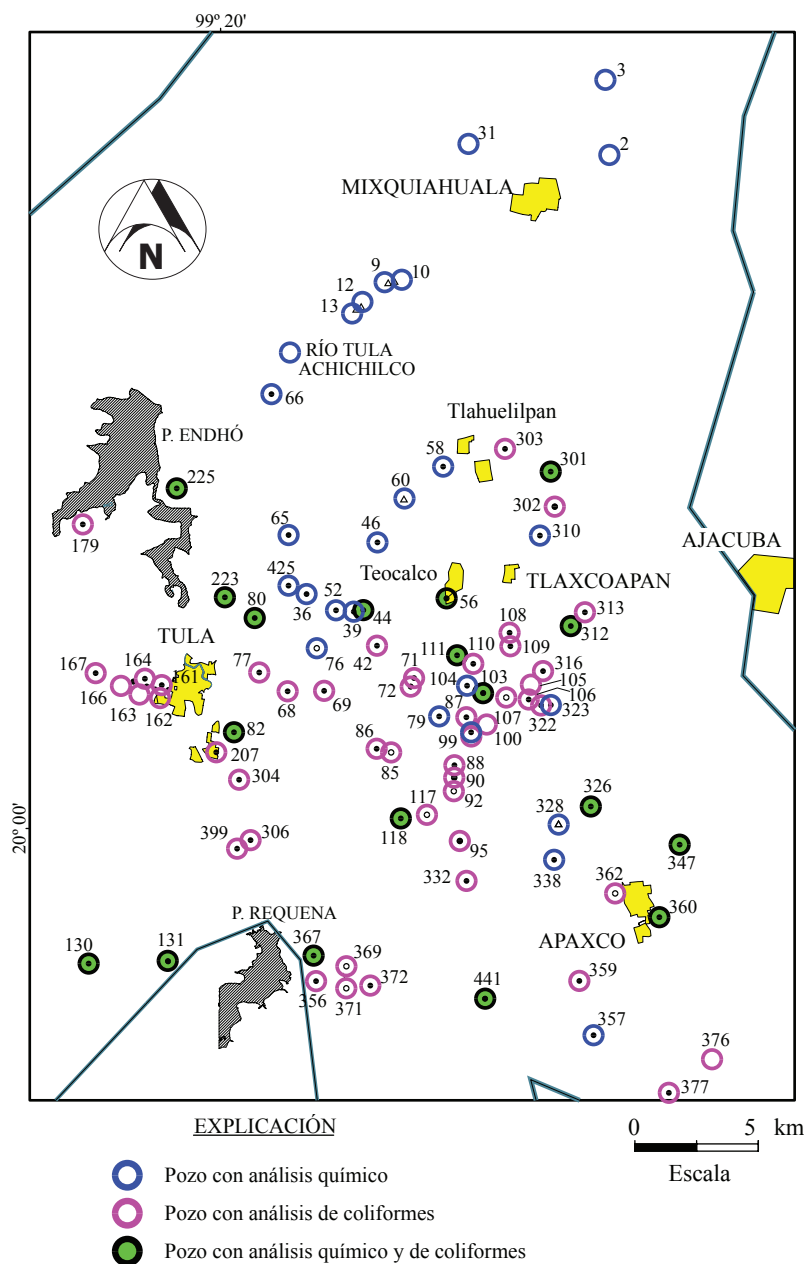


Figura 9. Localización de aprovechamientos muestreados para la caracterización hidrogeoquímica y de calidad el agua.

de 4052 mg/l. En la parte sur del valle, las concentraciones varían entre 2044 y 2812 mg/l de STD. En este trabajo también se determinó el boro en el agua de la zona estudiada debido a que el origen del agua de riego son aguas residuales y éstas tienden a contener boro. Lucho *et al.* (2005) estudiaron el fenómeno del fraccionamiento isotópico del boro en los sedimentos del valle del Mezquital, ya que estos sedimentos presentan contaminación con agua residual. En la zona de Jilotepec-Taxhimay las concentraciones de boro son del orden de 0.035 mg/l. En el valle del Mezquital se encuentran concentraciones relativamente altas, entre 0.880 y 2.067 mg/l en la zona entre Tula y Teocalco. También se detectaron valores entre 1.250 y 2.039 mg/l al sur de

Tlaxcoapan y concentraciones de 1.019 a 2.206 mg/l al noroeste de Apaxco (Tabla 2). De los setenta y cinco análisis bacteriológicos hechos en pozos de agua potable, 25 reciben cloración (Figura 9). De la totalidad de análisis, 30 pozos (40%) presentaron coliformes totales, y también en 8 de ellos a pesar de que reciben cloración (Tabla 3, Figura 11); en varias de estas captaciones también se encuentran coliformes fecales (Tabla 3). Estas bacterias deberían de estar ausentes en el agua de uso y consumo humano de acuerdo a la normatividad vigente.

Se clasificó el agua subterránea de acuerdo a su composición química tomando en cuenta los principales aniones y cationes en solución. Para ello se utilizaron

Tabla 1. Resultados de análisis físico-químicos.

POZO No.	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	STD (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	C.E. (µmhos/cm)	TEMP. (°C)	pH
LP	-	-	200	-	250.00	400	1,000	-	-	-	-
MZ-2	61.6	43.8	209	31.3	193	131	1,148	471	1,051	25.0	7.20
MZ-3	61.6	40.0	241	45.1	225	134	1,224	501	1,683	25.9	7.20
MZ-9	122	43.1	209	31.0	226	211		481	1,579	33.0	7.50
MZ-10	67.7	72.6	145	18.3	103	395	1,080	306	1,568	34.2	6.50
MZ-12	84.5	38.1	205	42.9	230	133		445	1,723	24.2	7.30
MZ-13	77.0	39.2	203	35.2	171	169	1,192	477			
MZ-22	26.9	14.7	366	16.7	306	107	1,132	440	1,709	39.5	7.40
MZ-27	64.6	37.1	87.6	13.7	85.5	87.0	768	353	1,043	25.7	7.50
MZ-28	16.9	11.2	293	43.2	196	99.5	1,060	446	1,435	20.7	7.80
MZ-31	33.9	42.5	46.0	2.61	36.0	81.7	496	270	606	25.3	7.30
MZ-36	248	81.3	284	45.9	263	862	2,284	346			
MZ-39	95.4	26.5	340	51.9	285	280		499			
MZ-44	103	32.4	310	33.9	207	381	1,540	452	2,135	24.2	7.30
MZ-46	89.9	29.9	230	34.0	230	92.1	1,120	528			
MZ-52	123	44.8	229	30.4	166	467	1,292	379	1,808	15.5	7.50
MZ-56	63.1	37.1	193	49.3	135	306	1,000	320	1,460	25.3	7.20
MZ-58	96.2	27.5	221	26.9	175	180	1,120	487	1,693	16.9	7.50
MZ-60	84.6	32.1	252	46.1	157	279	1,208	483	1,691	21.0	7.50
MZ-65	133	48.1	226	40.0	259	209	1,428	538			
MZ-66	117	58.0	208	42.9	294	163	1,304	497			
MZ-76	70.0	21.3	211	26.5	167	99.3	1,004	463	1,336	17.7	7.30
MZ-79	76.7	29.4	80.5	28.8	93.0	159	744	252	958	22.9	7.38
MZ-80	175	40.6	194	38.1	247	321	1,540	431	1,825	19.5	7.43
MZ-82	113	24.3	131	36.4	186	101	1,012	384	1,162	18.1	7.50
MZ-100	115	28.4	128	20.8	96.0	319	1,040	260	1,402	24.5	7.35
MZ-103	475	126	496	43.6	405	1,621	4,052	559	3,850	25.1	7.16
MZ-104	36.7	16.2	183	31.5	97.6	177	860	302			
MZ-111	148	57.9	194	44.7	206	499	1,520	282	1,702	23.2	7.31
MZ-118	541	86.2	116	28.2	335	1,103	2,812	352			
MZ-130	40.0	11.2	35.3	5.47	29.5	20.3	344	193	393	22.1	7.10
MZ-134	31.7	10.1	48.8	13.6	36.3	19.8	384	197	402	23.9	7.55
MZ-215	40.9	16.6	61.8	4.60	50.8	32.6	444	231	588	12.6	7.28
MZ-218	80.1	26.9	81.1	4.30	65.3	177		237			
MZ-223	158	41.5	155	28.0	179	330		366			
MZ-225	94.8	69.7	123	34.0	177	171	1,152	451			
MZ-241	13.3	7.10	29.5	3.49	25.0	11.3	252	95.5	216	27.5	8.20
MZ-242	16.4	6.60	29.6	5.19	23.6	4.90		118		26.2	7.54
MZ-243	20.0	11.2	15.5	5.22	11.3	17.4	276	117	224	18.9	7.56
MZ-246	13.3	10.1	18.0	4.73	9.10	20.1	232	99.5	173	24.1	7.64
MZ-251	23.3	11.2	14.5	4.48	20.4	30.5	252	91.5	260	17.8	6.41
MZ-255	18.4	6.10	18.9	4.23	11.3	11.5	232	105	211	17.9	6.81
MZ-266	15.0	8.10	9.91	2.50	6.80	25.1	196	69.7	185	21.5	7.54
MZ-270	38.4	6.10	10.6	2.25	11.3	44.3	244	97.5	344	14.1	7.64
MZ-274	21.7	5.10	20.3	3.24	6.80	20.1	236	111	208	17.3	7.46
MZ-275	13.3	2.00	45.5	4.94	18.2	15.2	244	123	195	25.4	7.43
MZ-279	35.0	11.1	32.0	6.34	18.2	44.8	300	159	418	24.5	7.70
MZ-286	13.9	2.70	29.6	4.38	6.80	13.7	184	109	193	19.5	7.33
MZ-292	10.9	3.30	14.0	4.00	16.3	6.95		53.5	87.0	9.80	8.03
MZ-295	5.50	5.00	10.8	2.51	12.7	5.10		47.5	69.0	16.7	
MZ-301	75.0	33.5	253	18.0	213	132	1,308	517	1,740	20.6	7.23
MZ-310	73.3	22.3	267	21.5	195	161	1,232	489	1,618	21.0	7.26
MZ-312	103	48.7	214	34.7	292	71.5	1,368	543	1,649	18.9	7.27
MZ-323	123	54.8	245	17.6	287	142	1,448	597	1,710		7.30
MZ-326	233	48.2	251	51.3	197	561	2,044	459	2,300	26.5	7.25
MZ-327	375	50.7	327	48.0	403	799	2,704	537	3,700	44.1	7.10
MZ-338	215	46.4	359	45.9	390	455	2,108	586	1,465	22.0	7.20

continúa

Tabla 1 (continuación). Resultados de análisis físico-químicos.

POZO No.	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	STD (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	C.E. (µmhos/cm)	TEMP. (°C)	pH
MZ-347	40.9	13.3	50.5	10.8	16.3	37.0	388	255			
MZ-357	41.7	24.4	97.1	11.9	25.0	247	604	191	757	24.8	
MZ-360	70.9	48.1	179	19.5	36.3	379	884	384			
MZ-367	30.0	11.1	116	14.6	65.8	23.6	680	318	747	23.1	7.39
MZ-425	256	76.3	171	31.0	205	666	1,852	392	2,205	21.9	7.50
MZ-441	49.1	16.6	76.3	28.0	47.2	56.6	556	304	812	28.6	7.43
C. Endhó M-2	57.2	29.9	179	31.0	128	95.5		469			
C.Requena M-2	57.2	34.8	224	37.0	250	138		352			
río Tula	114	53.1	84.3	19.8	163	175	676	324			
Achichilco											

LP = Límite permisible para agua de uso y consumo humano, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000). Valores en negritas sobrepasan la Norma.

Tabla 2. Resultados de análisis de metales.

POZO No.	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	F (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	Mn (mg/l)	Hg (mg/l)	Pb (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Zn (mg/l)
LP	0.20	0.025	-	0.005	2.00	0.30	1.50	-	0.15	0.001	0.01	-	5.00
MZ-2	ND	ND	0.92	ND	ND	0.019	1.56	0.35	ND	ND	ND	24.1	ND
MZ-3	ND	ND	0.96	ND	ND	0.019	1.16	0.30	ND	ND	ND	23.6	ND
MZ-10	ND	ND	0.59	ND	ND	0.060	4.81	<0.29	ND	ND	ND	12.3	ND
MZ-13	ND	ND	0.72	ND	ND	0.020	2.46	<0.29	ND	ND	ND	22.7	ND
MZ-22	ND	ND	0.59	ND	ND	0.026	0.52	4.64	ND	ND	ND	22.6	0.025
MZ-27	ND	ND	ND	ND	ND	0.023	0.23	<0.29	ND	ND	ND	21.2	ND
MZ-28	ND	ND	0.21	ND	ND	0.017	1.37	1.83	ND	ND	ND	18.7	ND
MZ-31	ND	ND	0.018	ND	ND	0.018	0.82	<0.29	ND	ND	ND	18.8	ND
MZ-36	ND	ND	2.06	ND	0.009	0.042	2.09	<0.29	ND	ND	0.026	7.62	0.022
MZ-44	ND	ND	0.95	ND	ND	0.023	0.78	<0.29	ND	ND	ND	22.1	0.082
MZ-46	ND	ND	1.17	ND	0.010	0.049	1.33	<0.29	ND	ND	0.020	6.45	0.015
MZ-52	ND	ND	0.80	ND	ND	0.028	1.04	<0.29	0.034	ND	ND	20.5	ND
MZ-56	ND	ND	0.56	ND	ND	0.021	1.98	<0.29	ND	ND	ND	21.9	ND
MZ-58	ND	ND	0.80	ND	ND	0.021	0.65	<0.29	ND	ND	ND	20.4	0.028
MZ-60	ND	ND	0.80	ND	ND	0.017	1.30	1.30	ND	ND	ND	21.1	ND
MZ-65	ND	ND	1.08	ND	0.009	0.041	1.52	<0.29	0.003	ND	0.022	6.64	0.038
MZ-76	ND	0.046	0.88	ND	ND	0.018	2.65	0.18	ND	ND	0.024	27.4	ND
MZ-79	ND	ND	0.35	ND	ND	0.014	2.77	0.18	ND	ND	0.028	29.8	ND
MZ-80	ND	ND	0.80	ND	0.010	0.30	1.76	0.081	ND	ND	0.024	27.4	ND
MZ-82	ND	0.21	0.88	ND	0.014	0.025	3.26	0.22	ND	ND	0.026	28.7	ND
MZ-100	ND	0.079	0.55	ND	ND	0.027	2.83	0.17	ND	ND	0.025	29.2	ND
MZ-103	ND	ND	2.03	ND	0.013	0.033	1.74	0.11	0.068	ND	0.025	28.4	0.086
MZ-104	ND	0.10	0.81	0.003	ND	0.030	3.91	0.16	ND	ND	0.027	28.3	ND
MZ-111	ND	0.045	0.71	ND	ND	0.017	2.49	0.15	ND	ND	0.028	29.8	ND
MZ-118	1.443	0.10	1.31	ND	ND	0.24	4.37	0.15	0.019	ND	ND	13.8	ND
MZ-130	ND	ND	0.046	ND	ND	0.018	0.11	0.18	ND	ND	0.025	23.5	ND
MZ-134	ND	ND	0.067	ND	0.025	0.019	1.43	0.07	ND	ND	0.031	29.2	ND
MZ-241	ND	ND	0.029	ND	ND	0.012	0.10	0.09	ND	ND	0.027	26.0	ND
MZ-242	ND	ND	0.074	ND	ND	0.018	0.35	0.13	ND	ND	0.023	26.0	0.023
MZ-243	ND	ND	0.047	ND	ND	0.013	0.28	0.15	ND	ND	0.026	14.5	ND
MZ-246	ND	ND	0.043	ND	ND	0.010	0.28	0.14	ND	ND	0.026	28.9	ND
MZ-251	ND	ND	0.036	ND	ND	0.018	0.30	0.11	ND	0.0003	ND	17.1	ND
MZ-255	ND	ND	0.039	ND	ND	0.014	0.33	0.23	ND	ND	0.053	25.7	ND
MZ-266	ND	ND	0.034	ND	ND	0.015	0.24	0.25	ND	ND	0.019	22.1	ND
MZ-270	ND	ND	0.035	ND	ND	0.010	1.32	0.28	ND	ND	0.020	22.8	ND
MZ-274	ND	ND	0.032	ND	ND	0.024	0.25	0.19	ND	ND	0.021	23.9	0.029
MZ-275	ND	ND	0.049	ND	ND	0.020	0.41	0.20	ND	ND	0.021	24.2	ND

continúa

Tabla 2 (continuación). Resultados de análisis de metales.

POZO No.	Al (mg/l)	As (mg/l)	B (mg/l)	Cd (mg/l)	Cu (mg/l)	Fe (mg/l)	F (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	Mn (mg/l)	Hg (mg/l)	Pb (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Zn (mg/l)
MZ-279	ND	ND	0.025	ND	ND	0.013	0.20	0.24	ND	ND	0.019	18.2	ND
MZ-281	ND	ND	0.033	ND	ND	0.074	0.42	0.10	ND	ND	0.017	19.9	ND
MZ-286	ND	ND	0.035	ND	0.032	0.015	0.12	0.12	ND	ND	0.033	3.00	
MZ-287	ND	ND	0.025	ND	ND	0.014	0.23	0.18	ND	ND	ND	31.6	ND
MZ-301	ND	ND	0.438	ND	ND	0.019	0.75	0.18	ND	ND	0.023	23.8	ND
MZ-310	ND	ND	1.09	ND	ND	0.037	1.53	0.22	ND	ND	0.025	26.2	ND
MZ-312	ND	ND	0.250	ND	ND	0.032	0.60	0.13	ND	ND	0.024	24.9	ND
MZ-323	ND	ND	0.724	ND	ND	0.015	2.02	0.25	ND	ND	0.024	26.6	ND
MZ-326	ND	0.114	1.01	ND	0.042	0.021	2.34	0.15	ND	ND	0.027	29.6	0.22
MZ-327	ND	0.416	2.20	ND	ND	0.018	4.43	0.30	0.006	ND	0.018	22.1	ND
MZ-347	ND	ND	0.22	ND	ND	0.079	1.32	<0.29	ND	ND	0.022	6.07	ND
MZ-357	ND	ND	0.21	ND	ND	0.019	1.14	0.12	ND	ND	0.026	29.1	ND
MZ-360	ND	ND	1.33	ND	0.014	0.14	1.41	<0.29	0.016	ND	0.023	6.79	0.03
MZ-367	ND	ND	0.37	ND	ND	0.020	1.10	0.10	ND	ND	0.025	28.9	ND
MZ-441	ND	ND	0.27	ND	0.011	0.190	2.90	<0.29	0.009	ND	0.023	6.21	0.027
C. Requena M-2	3.06	0.076	1.49	0.002	0.12	2.30	1.58	20.86	0.15	0.0008	0.051	8.23	0.46
C. Endho M-2	ND	ND	1.06	ND	0.012	0.13	1.53	9.38	0.14	ND	0.021	5.62	0.024
Río Tula Achichilco	ND	ND	0.24	ND	ND	0.019	0.73	<0.29	ND	ND	0.031	8.24	ND
C. Entrada aguas N. M-1	1.67	0.022	2.19	ND	0.061	1.23	2.00		0.14	0.0003	0.039	9.07	0.18
C. Entrada agua N. (Río Tula)	0.35	ND	0.76	ND	0.025	0.30	1.23		0.13	ND	0.027	6.60	0.076

LP = Límite permisible para agua de uso y consumo humano, de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000). Los valores en negritas sobrepasan la Norma; ND = No detectado.

diagramas de Piper (Figura 12). Se encontraron tres principales tipos o familias de agua: 1) Agua del tipo sódico-mixta, que se encuentra en los aprovechamientos al poniente de Tlahuelilpan y Teocalco. 2) Familia mixta-sulfatada, que se presenta en varios pozos de la parte sur del valle de Mezquital y que están relacionados con sedimentos evaporíticos del tipo de yesos y anhidritas. 3) Familia mixta-bicarbonatada, que corresponde a agua de lluvia de reciente infiltración y la cual se presenta en pozos y manantiales del poniente del valle del Mezquital, así como en la zona de Jilotepec y San Luis Taxhimay. Las aguas mixtas son aquellas en las cuales no predomina ningún ión (anión o catión) en especial.

Debido a la contaminación directa por el agua de los canales, una recomendación general (que ya se lleva a cabo en muchos casos) es que los pozos de agua potable tengan ademe liso cementado en su porción superior, lo que se denomina en perforación "ademe sanitario" y que en esta zona debe de ser de alrededor de 50 m. Los pozos públicos de agua potable de esta zona presentan ademe sanitario y tienen una profundidad que alcanza el acuífero profundo, lo cual evita la contaminación directa por las aguas superficiales.

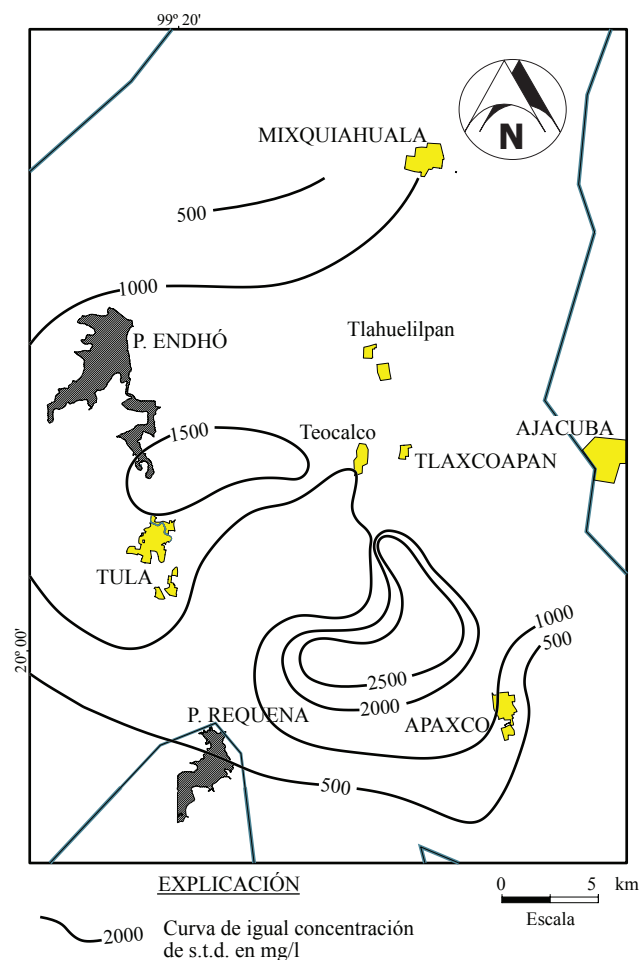


Figura 10. Configuración de sólidos disueltos totales (SDT) (2007).

Tabla 3. Resultados de análisis bacteriológicos.

Pozo No.	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Coliformes totales (NMP/100 ml)	¿Recibe cloración?
LP	ausente o no detectable		
MZ-42	ND	ND	NO
MZ-44	ND	4.60	NO
MZ-56	8.00	8.00	NO
MZ-68	ND	ND	NO
MZ-69	ND	ND	NO
MZ-71	1.00	ND	NO
MZ-73	ND	2.60	NO
MZ-80	ND	ND	NO
MZ-82	ND	ND	NO
MZ-85	ND	ND	NO
MZ-86	ND	1.10	NO
MZ-92	>8	>8	NO
MZ-95	8.00	8.00	NO
MZ-98	ND	ND	NO
MZ-102	ND	ND	NO
MZ-109	ND	4.60	NO
MZ-117	1.10	>8	NO
MZ-134	ND	1.10	NO
MZ-161	ND	1.10	NO
MZ-162	ND	ND	NO
MZ-163	ND	ND	NO
MZ-164	ND	ND	NO
MZ-166	ND	ND	NO
MZ-167	ND	1.10	NO
MZ-207	ND	ND	NO
MZ-301	ND	ND	NO
MZ-303	ND	ND	NO
MZ-304	ND	1.10	NO
MZ-307	ND	ND	NO
MZ-316	ND	ND	NO
MZ-322	ND	4.60	NO
MZ-326	4.60	>8	NO
MZ-347	ND	ND	NO
MZ-359	ND	ND	NO
MZ-360	ND	>8	NO
MZ-362	>8	>8	NO
MZ-367	ND	1.10	NO
MZ-369	8.00	>8	NO
MZ-371	8.00	>8	NO
MZ-372	ND	ND	NO
MZ-376	ND	ND	NO
MZ-384	ND	ND	NO
MZ-388	ND	ND	NO
MZ-389	ND	4.60	NO
MZ-392	ND	ND	NO
MZ-399	>8	>8	NO
MZ-439	ND	>8	NO
MZ-440	ND	ND	NO
MZ-442	ND	ND	NO
MZ-445	ND	ND	NO
MZ-39	ND	ND	SI
MZ-77	ND	ND	SI
MZ-87	>8	>8	SI
MZ-88	ND	2.60	SI
MZ-89	ND	1.10	SI
MZ-100	>8	>8	SI

continúa

Tabla 3 (continuación). Resultados de análisis bacteriológicos.

Pozo No.	Coliformes fecales (NMP/100 ml)	Coliformes totales (NMP/100 ml)	¿Recibe cloración?
MZ-105	ND	ND	SI
MZ-106	1.10	>8	SI
MA-108	ND	ND	SI
MZ-110	ND	ND	SI
MZ-111	ND	ND	SI
MZ-118	ND	ND	SI
MZ-130	ND	ND	SI
MZ-179	ND	ND	SI
MZ-223	ND	ND	SI
MZ-225	ND	ND	SI
MZ-302	ND	ND	SI
MZ-312	ND	ND	SI
MZ-313	ND	ND	SI
MZ-314	1.10	>8	SI
MZ-332	>8	>8	SI
MZ-356	ND	ND	SI
MZ-375	ND	>8	SI
MZ-437	ND	ND	SI
MZ-444	ND	ND	SI

LP= Límite permisible para agua de uso y consumo humano, de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 2000). Los valores en negritas sobrepasan la Norma. ND = No detectado.

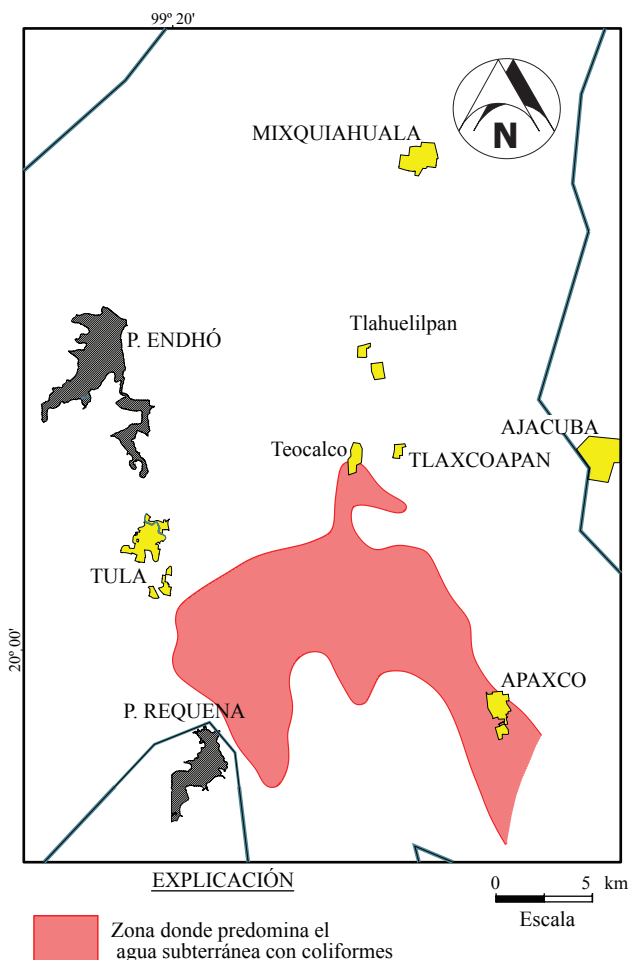


Figura 11. Zona donde predomina el agua subterránea con coliformes.

CONCLUSIONES

La Ciudad de México drena sus aguas residuales hacia el valle del Mezquital a través de los llamados Gran Canal del Desagüe, Interceptor Poniente y Emisor Central. Este valle recibe aproximadamente 50 m³/s de agua residual no tratada para el riego de alrededor de 45214 ha. Se determinó que el 81% de los canales principales y el 52% de los canales laterales no se encuentran revestidos y parte del agua residual que conducen, recarga directamente al acuífero. Actualmente la principal entrada de agua al acuífero del valle del Mezquital corresponde a la infiltración a través de canales y retornos de riego (de aguas residuales sin tratar provenientes de la Ciudad de México).

Con base en la piezometría realizada en este estudio, se diferenciaron dos acuíferos. Uno somero, que está representado en la mayor parte de los pozos existentes, con valores de profundidad del nivel estático de alrededor de 10 m. Otro denominado profundo por encontrarse su nivel estático 40 m más profundo. Se estableció que el flujo de agua subterránea va de sur a norte. Las salidas de agua del acuífero se llevan a cabo a través de manantiales que descargan al río Tula, otra parte es extraída por pozos y el resto descarga hacia el norte y noreste, tanto en forma superficial como subterránea. La evolución del nivel estático indica que el cambio de almacenamiento del acuífero es prácticamente cero.

Se realizó un balance del agua subterránea para el año 2007 de una porción del valle (donde existen datos

del acuífero), encontrando que las entradas subterráneas son de 10.6 Mm³/año, la infiltración es de 165 Mm³/año, la extracción es de 97.7 Mm³/año, las salidas subterráneas equivalen a 71.7 Mm³/año, el cambio de almacenamiento es cero y la evapotranspiración es de 6.1 Mm³/año. En el área de balance se obtuvo una infiltración por lluvia de 15.8 Mm³/año, retornos de riego de 69 Mm³/año y una infiltración por canales de 80.2 Mm³/año.

En cuanto a la calidad del agua, se determinó que el Na y los SDT generalmente se encuentran por arriba del límite máximo permisible. Se detectó arsénico en siete aprovechamientos localizados al sur de Tlaxcoapan, la mitad de los sitios analizados presentan fluoruros por arriba de la norma y la mayoría superan el límite de la norma respecto al plomo. Los fosfatos y el boro también se presentan en concentraciones altas en muchas de las muestras. De setenta y cinco análisis bacteriológicos hechos en pozos de agua potable, 30 de ellos presentaron coliformes totales y en varios de estos pozos también se encontraron coliformes fecales.

REFERENCIAS

- Ariel Consultores, 1999, Los recursos hidráulicos del Estado de Hidalgo y diagnóstico sobre su aprovechamiento: Estudio para la Comisión Estatal del Agua del Estado de Hidalgo, 119 pp.
- Birkle, P., Torres-Rodríguez, V., González-Partida, E., 1998, The water balance for the Basin of Mexico and implications for future water consumption: Hydrogeology Journal, 6(4), 500-517.
- Cajuste, L.J., Carrillo, R.G., Cota, E.G., Laird, R.J., 1991, The distribution of metals from wastewater in the Mexican Valley of Mezquital:

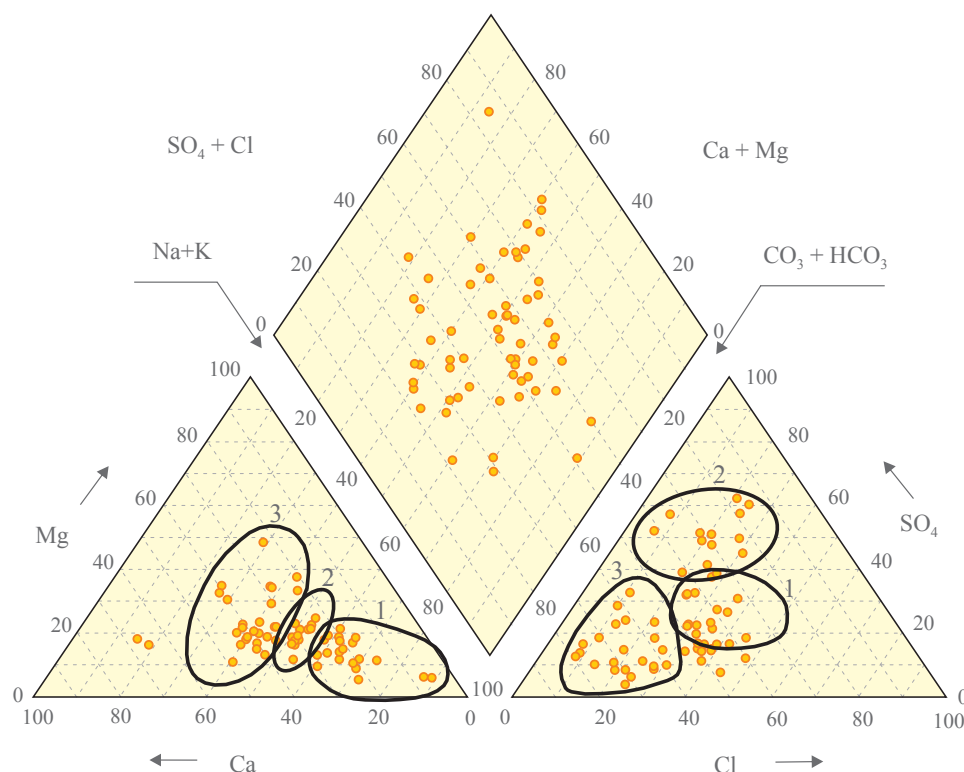


Figura 12. Diagrama de Piper. Grupo 1: agua sódico-mixta, Grupo 2: agua mixta-sulfatada, Grupo 3: agua mixta-bicarbonatada.

- Water Air and Soil Pollution, 57-58(1), 763-771.
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), Departamento de Geohidrología 1996, Estudio geohidrológico de factibilidad para la localización de tres pozos de abastecimiento de agua subterránea para la refinería Miguel Hidalgo, en Tula de Allende, Hidalgo, Reporte interno, 19 pp.
- Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México, 1967, El uso del agua negra para riego en los valles de México y el del Mezquital, Reporte interno, 18 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 1998, Impact of wastewater reuse of groundwater in the Mezquital Valley, Hidalgo State, Mexico. Estudio de cooperación entre la Comisión Nacional del Agua, British Geological Survey, London School of Hygienic and Tropical Medicine y University of Birmingham: México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 125 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2002, Determinación de la disponibilidad del agua en el Acuífero del Valle del Mezquital, Estado de Hidalgo, Reporte interno, 25 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2009, Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero 2801 Bajo Río Bravo, Tamaulipas: Diario Oficial de la Federación, 28 de agosto de 2009, 2 pp.
- Daughton, C.G., Ruhoy, I.S., 2009, Environmental footprint of pharmaceuticals: The significance of factors beyond direct excretion to sewers: Environmental Toxicology and Chemistry, 28(12), 2495-2521.
- Downs, T.J., Cifuentes-García, E., Suffet I., 1999, Risk screening for exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico City region: Environmental Health Perspectives, 107(7), 553-561.
- Fetter, C.W., 1994, Applied Hydrogeology: New Jersey, Prentice Hall, 3rd. edition, 691 pp.
- Flores, L., Blas, G., Hernández, G., Alcalá, R., 1997, Distribution and sequential extraction of some heavy metals from soils irrigated with wastewater from Mexico City: Water Air and Soil Pollution, 98(1-2), 105-117.
- Friedel, J.K., Langer, T., Siebe, C., Stahr, K., 2000, Effects of long-term waste water irrigation on soil organic matter, soil microbial biomass and its activities in Central Mexico: Biology and Fertility of Soils, 31(5), 414-421.
- Gallegos, E., Warren, A., Robles, E., Campoy, E., Calderón, A., Sainz, M.G., Bonilla, P., Escolero, O., 1999, The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico: Water Science and Technology, 40(2), 45-52.
- Geocalli, S.A., 1981, Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo. Estudio elaborado para la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 87 pp.
- Hidrotec, S.A., 1969, Estudio geohidrológico del Valle del Mezquital, Hgo. Estudio elaborado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 178 pp.
- Huerta, L., Contreras-Valadez, R., Palacios-Mayorga, S., Miranda, J., Calva-Vasquez, G., 2002, Total elemental composition of soils contaminated with wastewater irrigation by combining IBA techniques: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 189(1-4), 158-162.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1983a, Carta geológica Pachuca F14-11, escala 1:250,000, México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1983b, Carta geológica Ciudad de México E14-2, escala 1:250,000, México, D.F., Secretaría de Programación y Presupuesto, 1 mapa.
- Kruseman, G.P., Ridder N.A., 1994, Analysis and evaluation of pumping test data: International Institute for Land Reclamation and Improvement, The Netherlands, 2nd Edition, 377 pp.
- Lucho, C.A., Prieto-García, F., Del Razo, L.M., Rodríguez-Vázquez, R., Poggi-Varaldo, H.M., 2005, Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico: Agriculture, Ecosystems & Environment, 108(1), 57-71.
- Jiménez, B., Chávez, A., 2004, Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: "El Mezquital Valley" case: Water Science and Technology, 50(2), 269-276.
- Marín, L.E., Steinich, B., Escolero, O., Leal, R.M., Silva, B., Gutiérrez, S., 1998, Inorganic water quality monitoring using specific conductance in Mexico: Ground Water Monitoring and Remediation, 18(1), 156-162.
- Mooser, F., Montiel, A., Zúñiga, A., 1996, Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos: Comisión Federal de Electricidad. México, D.F., Reporte interno, 26 pp.
- Organización Internacional de Energía Atómica, 1975, Estudio con técnicas isotópicas de las aguas subterráneas del Valle del Mezquital, México. Estudio elaborado con la UNAM y la CFE, Reporte interno, 22 p.
- Ortega-Larrocea, M.P., Siebe, C., Bécard, G., Méndez, I., Webster, R., 2001, Impact of a century of wastewater irrigation on the abundance of arbuscular mycorrhizal spores in the soil of the Mezquital Valley of Mexico: Applied Soil Ecology, 16(2), 149-157.
- Ortega-Larrocea, M.P., Siebe, C., Estrada, A., Webster, R., 2007, Mycorrhizal inoculum potential of arbuscular mycorrhizal fungi in soils irrigated with wastewater for various lengths of time, as affected by heavy metals and available P: Applied Soil Ecology, 37(1-2), 129-138.
- Page, D., Dillon, P., Toze, S., Bixio, D., Genthe, B., Jiménez-Cisneros, B.E., Wintgens, T., 2010, Valuing the subsurface pathogen treatment barrier in water recycling via aquifers for drinking supplies: Water Research, 44(6), 1841-1852.
- Pecten, S.A. de C.V., 1994, Caracterización geohidrológica del Estado de Hidalgo, Reporte interno, 101 pp.
- Ramírez-Fuentes, E., Lucho, C., Escamilla-Silva, E., Dendooven L., 2002, Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time: Bioresource Technology, 85(2), 179-187.
- Reyes-Solis, I.E., Solís, C., Isaac-Olive, K., García, N.E., Andrade, E., 2009, Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in Central Mexico by particle induced X-ray emission: Microchemical Journal, 91(1), 129-132.
- Secretaría de Salubridad y Asistencia (SSA), 2000, Modificación a la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización: Diario Oficial de la Federación. 22 de noviembre de 2000.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 1997, Carta geológico-minera, Pachuca F14-11, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, Secretaría de Economía, 1 mapa.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2002, Carta geológico-minera, Ciudad de México E14-2, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, Secretaría de Economía, 1 mapa.
- Siemens, J., Huscsek, G., Siebe, C., Kaupenjohann, M., 2008, Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City-Mezquital Valley: Water Research, 42(8-9), 2124-2134.
- Solís, C., Isaac-Olive, K., Mireles, A., Vidal-Hernández, M., 2009, Determination of trace metals in cow's milk from waste water irrigated areas in Central Mexico by chemical treatment coupled to PIXE: Microchemical Journal, 91(1), 9-12.
- Turc, L., 1961, Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle: Annales Agronomiques, 12(1), 13-49.
- Viessman, W., Gary, L., Knapp, J.W., 1989, Introduction to Hydrology: New York, Harper & Row Publishers, 3rd. edition, 780 pp.

Manuscrito recibido: Febrero 19, 2010

Manuscrito corregido recibido: Enero 30, 2011