

CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO PROFUNDO DEL VALLE DE TOLUCA, EDO DE MÉXICO. MÉXICO

M. Vicenta Esteller¹ & Carlos Díaz-Delgado¹

Resumen - El acuífero del Valle de Toluca, localizado en el Altiplano Mexicano, está sometido a una intensa explotación para cubrir, esencialmente, las necesidades de agua potable de los municipios de la zona, así como de la Ciudad de México. En este valle existe una alta densidad de población propiciada por el asentamiento de grandes zonas industriales, lo cual a su vez ha provocado la generación de grandes volúmenes de residuos. Además, se trata de un área agrícola, lo cual implica el uso de fertilizantes y plaguicidas. Ante esta problemática cabe suponer que el acuífero pueda tener cierto grado de contaminación. El estudio hidrogeoquímico realizado para comprobar esta hipótesis permitió establecer que el agua subterránea del Valle de Toluca presenta una facies hidroquímica de tipo bicarbonata sódica-magnésica. Así mismo, se detectó la presencia de altos contenidos de Fe y Mn, lo cual sugiere una posible contaminación industrial pero las bajas concentraciones del resto de los metales nos permiten afirmar que el origen de estos dos metales es natural ya que los minerales que conforman las rocas volcánicas tienen altos contenidos en ambos iones. Tampoco se detectaron altos contenidos de nitratos relacionados con el uso de fertilizantes en agricultura y/o por vertido de aguas residuales.

Palabras clave - Hidrogeoquímica, contaminación, metales pesados.

¹ Centro Interamericano de Recursos del Agua – Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México
Cerro Coatepec S/N C.U. 50130 Toluca (Edo. De México) MEXICO
Teléfono: (52) 729 65550 Fax: (52) 729 65551 Email: esteller@coatepec.uaemex.mx

1. INTRODUCCIÓN

Hasta hace algunos años la preocupación por la fuente de abastecimiento de agua potable se concentraba en los volúmenes disponibles; sin embargo recientemente ha aumentado la preocupación por la calidad del agua y el deterioro provocado por las actividades antrópicas.

En general, se consideraba que el agua subterránea era una fuente poco susceptible a la contaminación, por lo que hay pocos estudios sobre este tema en México. Además, un problema que se plantea a la hora de analizar los patrones hidrogeoquímicos de los acuíferos es la heterogeneidad y anisotropía de los medios por donde circula el agua; así como la escasa información disponible.

La Cuenca Alta del Río Lerma se encuentra en la región conocida como Altiplano Mexicano y es un importante centro de actividades industriales y agropecuarias; consecuentemente, esta cuenca ha sufrido un aumento del número de sus habitantes con el consiguiente incremento de las necesidades de agua potable. A este hecho, hay que añadir la importación de agua subterránea que lleva a cabo la Ciudad de México para cubrir sus necesidades de abastecimiento humano, lo cual representa un caudal de 14 m³/s, caudal que se extrae de los acuíferos del Valle de Toluca y del Valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca, ambos localizados en la cuenca. De estos dos valles, el que está sometido a una mayor explotación de sus aguas es el Valle de Toluca.

En el caso concreto del Valle de Toluca, la alta densidad poblacional está propiciada por el establecimiento y desarrollo de zonas industriales, por lo que el área se ha convertido en un polo de fuerte desarrollo económico donde se genera gran cantidad de desechos industriales y domésticos que han colaborado para que la Cuenca Alta del Río Lerma, dentro de la cual se ubica el Valle de Toluca, sea considerada como una de las cuencas más contaminada del país.

Además de la actividad industrial, el Valle de Toluca presenta una importante actividad agrícola ya que más del 78% de la superficie está dedicada a la agricultura (Díaz-Delgado et al., 1998). Esta actividad agrícola lleva consigo la utilización de productos químicos, tales como los fertilizantes y plaguicidas.

Ante esta problemática se planteó la necesidad de llevar a cabo un estudio hidrogeoquímico del acuífero que permita determinar las principales características físico-químicas del agua subterránea, establecer su posible grado de contaminación y definir su calidad como agua potable. Hay que tener en cuenta que para el Valle de Toluca no existen investigaciones que hayan abordado la hidrogeoquímica del acuífero. Sólo se

tiene referencia de un trabajo sobre la presencia de metales pesados en niveles someros del acuífero (Madrigal y Llorente, 1993).

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la porción central de la República Mexicana y más concretamente en zona central del Estado de México, siendo uno de los valles de mayor elevación del altiplano mexicano (Figura 1). El Valle de Toluca queda enmarcado dentro del Curso Alto del Río Lerma que comprende la vertiente norte de la Sierra Nahuatlaca-Matlazinca, así como la vertiente nororiental del Nevado de Toluca (4.690 msnm). El Valle de Toluca tiene una elevación media de 2570 msnm hasta la presa José Antonio Alzate. Aproximadamente, a 9 Km aguas debajo de la presa, y a una altitud de 2.570 msnm, termina el Curso Alto del Río Lerma, al descender el escalonamiento tectónico del Valle de Atacomulco-Ixtlahuaca formado por el bloque y sistemas de fallas de Perales.

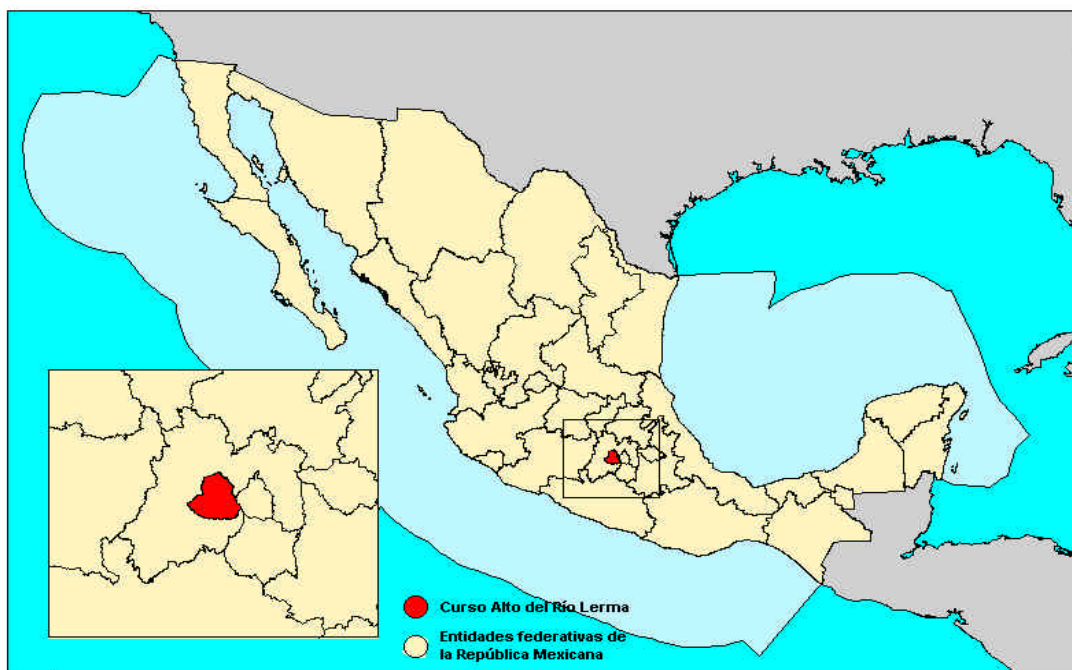


Figura 1. Localización geográfica de la región Curso Alto del río Lerma

El Valle de Toluca tiene una extensión entorno a los 700 Km², con un eje mayor orientado de norte a sur con una longitud de casi 35 Km y un eje menor orientado de este a oeste, con 20 Km de longitud, aproximadamente. Sus límites son al norte, el volcán La Guadalupeana, el Cerro El Aguila y la Sierra Monte Alto, al sur el volcán Tenango y el

volcán Zempoala, al este la Sierra de Las Cruces y Las Iglesias y al oeste el volcán Nevado de Toluca y la Sierra Morelos.

El área de estudio se encuentra ubicada, específicamente, en la provincia fisiográfica denominada “Eje Neovolcánico Transmexicano” (Deman et al., 1978), región constituida por una franja de naturaleza volcánica de tipo calcoalcalino, cuya edad corresponde al Cenozoico Superior.

La secuencia litológica está constituida por varios tipos de rocas volcánicas del Terciario, fundamentalmente basaltos y andesitas, así como materiales piroclásticos y brechas, los cuales afloran en las sierras que circundan el valle (Figura 2). En el valle, se identifican sedimentos lacustres y aluviales que se encuentran intercalados con materiales clásticos de origen volcánico. A estos depósitos se les asigna una edad correspondiente al Plioceno Tardío – Cuaternario (Honorio y Hernández, 1982 y Herrera y Sánchez, 1994).

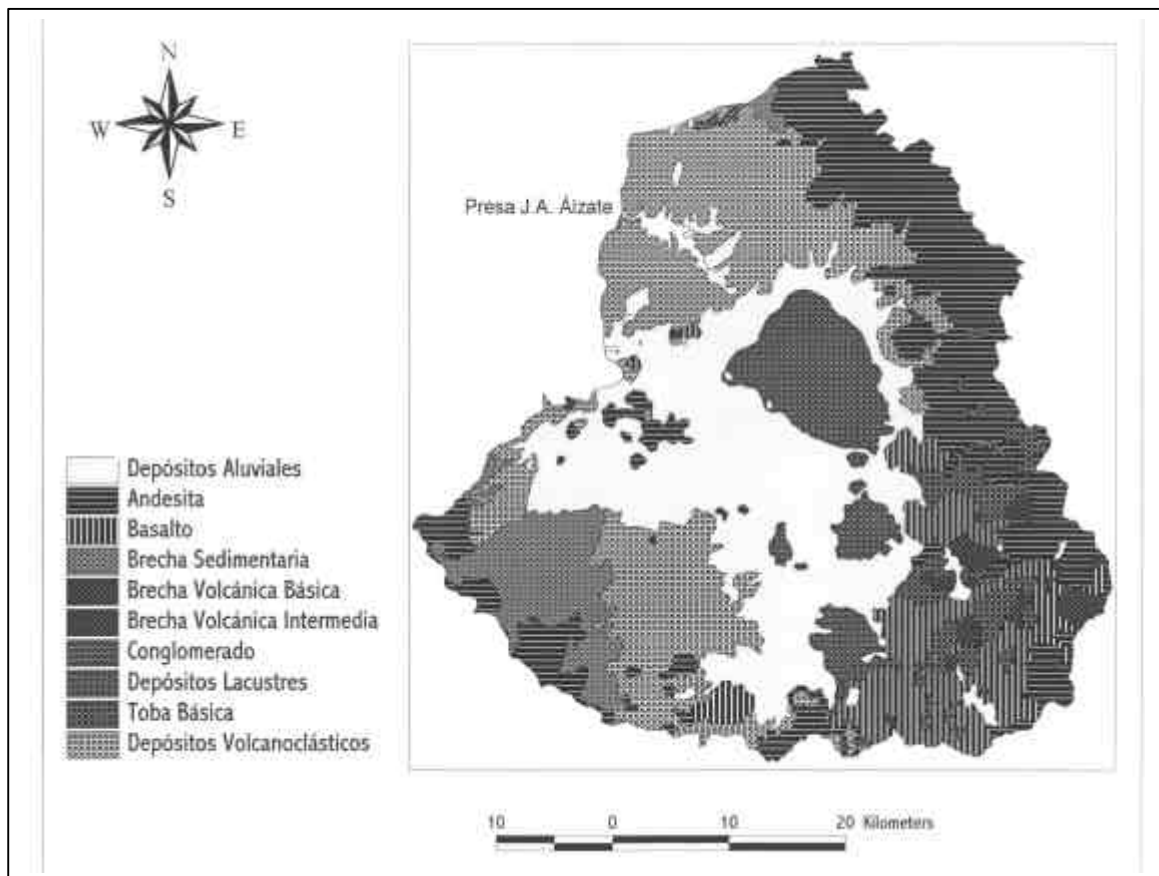


Figura 2. Mapa geológico del Valle de Toluca y áreas adyacentes

La mayor intensidad de precipitación en un día se presenta en las zonas más altas donde llueve entre 80 y 120 mm. En el resto de la cuenca se presentan intensidades entre 60 y 80 mm. Aproximadamente el 85 % de la precipitación ocurre entre los meses de mayo y octubre. La precipitación anual varía entre 1.300 mm en las áreas de mayor altitud y los 800 mm de la zona llana. En esta zona llana, que corresponde al Valle de Toluca, la temperatura promedio anual es del orden de 14°C, la máxima promedio es de 17°C y la mínima es de 0°C. En cuanto a la evaporación (Lesser et al., 1992), cabe decir que los valores menores se presentan durante octubre y enero, con valores que oscilan entre 83 y 100 mm; a partir de febrero la evaporación se incrementa hasta alcanzar máximos de casi 150 mm en marzo y abril.

La elevada concentración de población en el valle es propiciada por el establecimiento y desarrollo de zonas industriales en lugares como Toluca, Lerma y Tianguistenco, lo cual produce gran cantidad de desechos industriales y domésticos tanto líquidos como sólidos. Así mismo, en la zona existe una intensa actividad agrícola, siendo el cultivo predominante el maíz que llega a ocupar casi el 80% del suelo cultivable, asimismo, existen cultivos, a menor escala, de frijol, trigo, papas, avena y hortalizas.

3. MARCO HIDROGEOLOGÍCO

3.1. CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS Y GEOMÉTRICAS

La zona de estudio se localiza en la provincia geohidrológica Faja Volcánica Transmexicana. Como características generales de esta provincia se pueden señalar la presencia de basaltos con una alta permeabilidad debida, principalmente, al grado de fracturación, así como a la presencia de tubificaciones en los derrames y a la intercalación de material escoráceo. Estos acuíferos volcánicos fracturados están cubiertos, en los valles, por depósitos lacustres y aluviales, cuya permeabilidad es muy variable, por lo que se convierte en acuíferos confinados o semiconfinados que se caracterizan por tener un coeficiente de almacenamiento bajo. Los niveles de material piroclástico tienen una alta porosidad, pero su permeabilidad es baja por lo que funcionan como acuitardos. Los depósitos lacustres del Plioceno Tardío se caracterizan por su poca permeabilidad por lo que constituyen acuitardos. Los materiales aluviales no consolidados (gravas, arenas, arcillas y limos) forman acuíferos someros cuya transmisividad varía con base al tamaño de grano y al espesor del estrato. Como basamento o basamento de los valles suelen aparecer rocas andesíticas que actúan como impermeable de base; en el caso de valles

tectónicos, este basamento se puede encontrar a cientos de metros de profundidad (Velázquez y Ordaz, 1994).

En el caso concreto del acuífero del Valle de Toluca, este acuífero está formado por materiales detríticos marcadamente heterométricos, con predominio de gravas, arenas y conglomerados con matriz arcillosa-limosa aunque también se pueden diferenciar intercalaciones de niveles de piroclastos y tobas. Sobre la base de estas características se puede señalar que este sistema está formado por varios niveles acuíferos superpuestos que constituyen un acuífero multicapa, pero la existencia de cierta continuidad hidráulica permiten considerar un sistema de flujo único. No obstante, existen diferencias significativas de carga hidráulica (Unitecnica, 1996).

Estos materiales detríticos reposan sobre un basamento constituido por material volcánico consolidado cuya naturaleza es variable. En algunos sondeos realizados por la Gerencia Regional del Valle de México se ha establecido la presencia de basaltos y andesitas a profundidades superiores a los 100 metros (Unitecnica, 1996).

Los límites de este acuífero son:

- ◆ Al norte, el volcán La Guadalupana, el cerro El Aguila y la Sierra Monte Alto y el Valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco, que definen un límite abierto ya que existe una conexión hidráulica entre los dos valles.
- ◆ Al sur el volcán Tenango y el volcán Zempoala, que constituye un límite abierto entre los materiales detríticos y los volcánicos fracturados que afloran en esta zona.
- ◆ Al este la Sierra de Las Cruces y Las Iglesias que forman un límite permeable ya que se establece una conexión entre los depósitos detríticos y los afloramientos de materiales volcánicos fracturados.
- ◆ Al oeste el volcán Nevado de Toluca y la Sierra Morelos, que definen un límite abierto por lo que existe una comunicación hidráulica entre los acuíferos fracturados y el material detrítico que constituye el valle.

3.2. CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS

Los parámetros hidráulicos del acuífero del Valle de Toluca abarcan un amplio rango debido a la variabilidad litológica y geométrica de los depósitos. De todos modos se pueden diferenciar zonas en función de la transmisividad: la zona correspondiente al pie de monte de la Sierra de Las Cruces (NE), con valores que alcanzan hasta los 13.000

m²/día, el sector de Lerma con una transmisividad media de 950 m²/día, el área de Almoloya del Río (SE) con valores que en torno a 22.000 m²/día y la parte central con una transmisividad que varía entre 90 y 400 m²/día. El coeficiente de almacenamiento varía entre 0.3 y 0.9% (CCRECRL, 1993).

Previa a la intensa extracción del agua subterránea (en 1970 se concluyeron las obras de 230 pozos y de 170 Km de acueducto en los valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca que aportan algo más de 14 m³/s a la ciudad de México) existía todo un sistema lagunar en la zona de Almoloya del Río, cuya extensión ha ido disminuyendo con los años por efecto de los bombeos. Otro proceso que se ha constatado, debido a este intenso bombeo, es el descenso del nivel piezométrico en casi todo el acuífero.

En el mapa piezométrico correspondiente al periodo octubre - diciembre de 1996 (Figura 3), se puede apreciar que la recarga principal proviene del Nevado de Toluca y que la circulación del agua subterránea es hacia el centro del valle, distribuyéndose en tres direcciones, hacia el SE y E hasta llegar al pie de la Sierra de Las Cruces, y hacia el N para dirigirse hacia el valle de Atlacomulco-Ixtlahuaca. El principal rasgo que se puede apreciar es la influencia de la batería de pozos instalada al pie de la Sierra de Las Cruces para extraer agua destinada a la Ciudad de México, lo cual implica que el flujo proveniente de la sierra en dirección al Valle ha sido interceptado por la batería de pozos, perdiéndose su influencia hacia el interior del valle.

Por otro lado, en el área de la Presa José Antonio Alzate se observa cierta recarga desde ésta hacia el acuífero, pues la pendiente de la superficie piezométrica se reduce sensiblemente, apreciándose como el flujo del agua subterránea tiende a dirigirse hacia el río Lerma.

El mapa de isodescensos para el periodo 1971-1996 (Figura 4) presenta un cono de depresión piezométrica en el área de Toluca, con un descenso que alcanza los 35 metros, lo cual indica que la velocidad de este descenso ha sido de 1.4 m/año. En el caso del área de la presa José Antonio Alzate el descenso es prácticamente nulo.

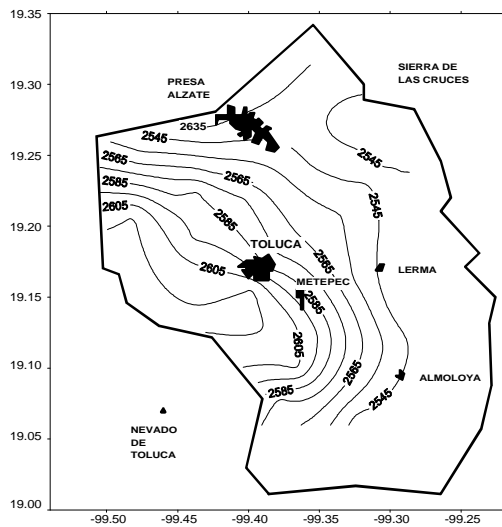


Figura 3. Mapa de isopiezas. 1996

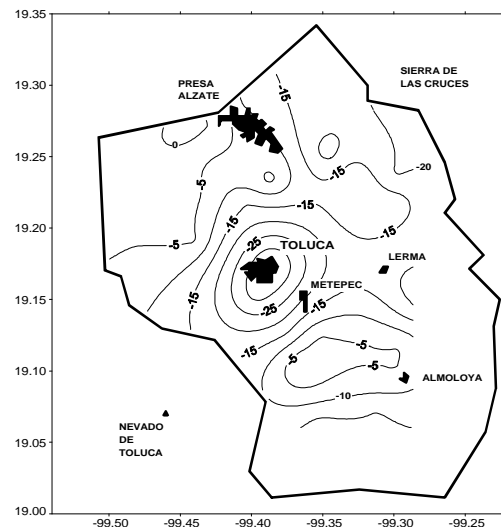


Figura 4. Isodescensos 1971-1996

Para efectuar el estudio de la evolución temporal se han elegido dos puntos acuíferos pertenecientes a la red de observación que existe en el acuífero. Estos piezómetros son el pl 144 , localizado en el sector sur del Valle de Toluca, y el pl 201 ubicado en el centro urbano de la ciudad de Toluca. Para estos piezómetros se tiene un periodo de observación de 28 años, con medidas anuales que se efectuaban entre los meses de octubre y noviembre.

La figura 5 muestra la evolución del nivel piezométrico para el punto pl 144. Se aprecia claramente el descenso del nivel desde el inicio de la toma de datos, con un descenso total al final del periodo de observación de casi 30 metros, lo que indica una velocidad de descenso de casi 1 metro por año. Una evolución similar se puede apreciar en el punto pl 201, aunque en este caso la velocidad de descenso ha sido mayor, de 1.7 metros al año (Figura 6)

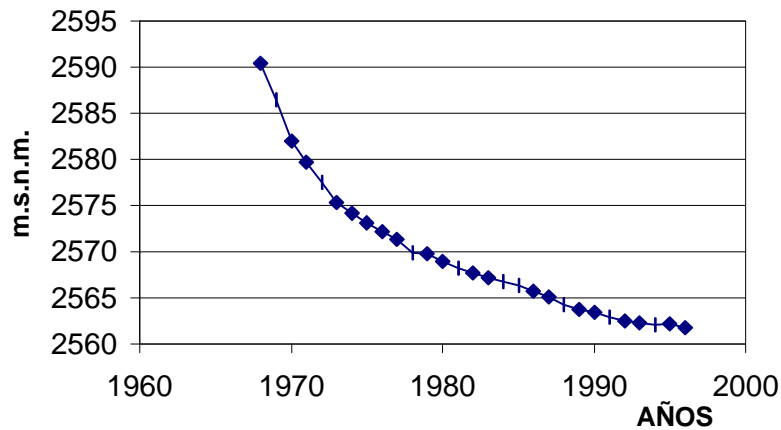


Figura 5. Evolución del nivel piezométrico en el punto pl 144 (periodo 1968-1996)

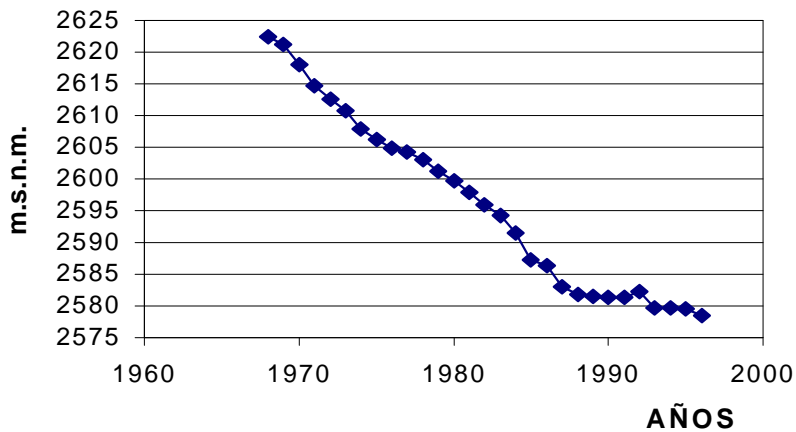


Figura 6. Evolución del nivel piezométrico en el punto pl 201 (periodo 1968-1996)

Otros fenómenos ligados a la fuerte explotación del acuífero han sido la disminución de los caudales en los manantiales y la aparición de grietas en el terreno que parecen estar relacionados con asentamientos producidos por el descenso del nivel piezométrico (Unitecnia, 1996).

En el informe elaborado para la Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma (CCRECRL, 1993) se realizó un balance hidráulico para el acuífero pero no se indica a que periodo de tiempo corresponde. Las entradas totales se cuantificaron en 380 Hm³/año, de los cuales 101 Hm³/año proviene de la alimentación lateral desde el Nevado de Toluca, 198 Hm³/año por alimentación lateral desde la Sierra de Las Cruces y 81 por infiltración directa del agua de lluvia. Las salidas se valoraron en 385 Hm³/año, estas salidas se producen por descargas subterráneas

hacia el valle de Ixtlahuaca-Atlacomulco con un valor de 2 Hm³/año y por bombeo, el cual se cuantificó en 383 Hm³/año. El balance global del acuífero indica un desequilibrio entre entradas y salidas, ya que las salidas son superiores a las entradas en 5 Hm³/año.

Del volumen total extraído, 163 Hm³/año se utilizan en el mismo Valle de Toluca, los cuales se reparten en un 79 % para abastecimiento urbano, 12.9 % para uso industrial y 8.1% dedicado a las actividades agropecuarias. Por otra parte, la ciudad de México recibe de este acuífero 220 Hm³/año para cubrir sus necesidades de agua potable.

En la actualidad el acuífero del Valle de Toluca está sometido a veda, lo cual implica que no se pueden construir nuevas captaciones.

El modelo hidrogeológico conceptual de este valle se basa en un flujo regional que se realiza desde las partes altas hacia el centro del valle, continuando en dirección al noreste siguiendo más o menos la traza del río Lerma. La recarga del acuífero se realiza en las zonas de mayor altitud a través de las rocas basálticas – andesíticas aflorantes, que dado su nivel de fracturamiento poseen excelentes características hidráulicas y la descarga se produce casi exclusivamente por bombeo, lo cual ha provocado la aparición de conos de descenso del nivel piezométrico.

4. CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS

El estudio hidrogeoquímico histórico se ha basado en las campañas de muestreo que anualmente realiza, desde 1991, la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado de México (CEAS), durante los meses de mayo y junio. En este trabajo solamente se presentan los resultados de las campañas de 1993 (12 puntos de muestreo), 1995 (54 puntos de muestreo) y 1997 (41 puntos de muestreo).

Los muestreos se realizaron en varios sondeos de abastecimiento urbano que se localizan en los municipios de Almoloya de Juárez, Calimaya, Lerma, Metepec, Toluca, Oztolotepec y Zinacantepec. Los sondeos tienen características similares de construcción, con profundidades en torno a los 250 metros y cementados en las primeras decenas de metros. Casi todos estos sondeos explotan materiales detríticos de origen volcánico, fundamentalmente tobas y brechas formadas por fragmentos de andesitas y basaltos, los cuales constituyen uno de los niveles acuíferos del Valle de Toluca, al que se le podría llamar acuífero profundo.

Una vez recogidas las muestras de agua, estas fueron analizadas en el Laboratorio de Control de Calidad del Agua del Gobierno del Estado de México. Los parámetros químicos determinados fueron: bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, calcio, magnesio,

sodio y potasio. Así mismo, se determinó conductividad, pH, sólidos disueltos, elementos minoritarios, como F, Fe y Mn, y elementos traza, como Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr total, Hg, Pb y Zn.

En 1998, el Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA) realizó una campaña de muestreo que incluyó 39 puntos acuíferos distribuidos en todo el Valle de Toluca. Las muestras de agua se analizaron en el Laboratorio de Calidad del Agua del CIRA, determinándose pH, conductividad, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato, calcio, magnesio, sodio y potasio.

La toma de muestras, su conservación y la determinación de los parámetros se llevó a cabo siguiendo las normas vigentes en México, las cuales están basadas en los métodos propuestos por la APHA, AWWA y WPCF (1989).

Como tratamiento de datos se elaboraron los mapas de isocontenidos de aquellos parámetros que presentaron mayor interés. Estos mapas se trazaron aplicando el programa SURFER V.6 (Golden Software, Inc, 1997). También se utilizó el diagrama Piper para definir las distintas facies hidroquímicas presentes en el agua.

Entre las técnicas estadísticas utilizadas cabe señalar el análisis multivariante que se aplicó sobre una matriz de dimensiones $n \times m$, donde n es el número de observaciones y m , el de variables (Davis, 1986; Bisquerra, 1989). Cada observación corresponde a un análisis físico-químico de fecha y posición diferente y las variables son cada una de las características físico-químicas determinadas en las muestras. Este tipo de estudio estadístico se puede utilizar, por ejemplo, para establecer la relación entre diferentes parámetros físico-químicos (Morell et al., 1996).

4.1. RASGOS GENERALES

a) Datos históricos

En la Tabla 1 se exponen las principales características físico-químicas del agua subterránea muestreada durante las campañas de 1993, 1995 y 1997, con base a valores máximos, mínimos y medios. Como rasgo hidrogeoquímico básico se puede señalar el predominio de los iones bicarbonatos y magnesio y la baja presencia de nitratos. Así mismo, se aprecia que los valores obtenidos para algunos de los parámetros establecidos en la norma sobre agua potable (NOM 127-SSA1, 1994) están por debajo del límite máximo.

Tabla 1. Características físico-químicas del agua subterránea del Valle de Toluca para las campañas de 1993, 1995 y 1997 (unidades en mg.L⁻¹, excepto conductividad en µS/cm).

Parámetros	A. Potable Limite	Año 1993				Año 1995				Año 1997			
		Min	Max	\bar{X}	D.S.	Min	Max	\bar{X}	D.S.	Min	Max	\bar{X}	D.S.
pH	6.5-8.5	7.5	8.1	7.8	0.2	6.6	8.5	7.6	0.3	7.2	8.0	7.6	0.2
Conduct.		155	297	231	46	117	466	226	74	111	351	219	58
HCO ₃ ⁻		90	166	131	25	63	264	126	39	71	264	123	38
SO ₄ ²⁻	400	3	20	9	5	1	117	8	18	1	21	7	5
Cl ⁻	250	6	16	14	3	6	52	14	8	6	24	13	4
NO ₃ ⁻	43	0.7	28.9	7.6	8.7	0.3	38.1	8.6	8.3	0.1	29.6	5.5	6.5
Mg ²⁺		6	15	10	2	6	33	14	5	8	29	13	4
Ca ²⁺		5	11	7	2	6	32	13	5	5	21	12	3
Na ⁺	200	18	55	39	11	6	37	19	8	6	43	20	8

b) Campaña de 1998

En esta campaña se obtuvieron valores muy similares a los que se presentaron en anteriores muestreos; sólo cabe señalar una mayor presencia de sulfatos en algunos pozos, lo cual repercute en valores de conductividad más elevados (Tabla 2). También cabe destacar valores de nitratos superiores a los 50 mg L⁻¹ (por encima del límite máximo para agua potable), aunque la mayoría de pozos presentan valores inferiores a los 10 mg L⁻¹.

La mineralización coincide con la que teóricamente debe de tener un agua subterránea en ambiente volcánico; los feldspatos contribuyen con sodio, calcio y potasio, y los piroxenos y biotitas con calcio y magnesio. La presencia de sulfatos y cloruros es baja ya que las rocas volcánicas contienen dichos iones en poca cantidad. (Custodio y Llamas, 1983; Appelo y Postman, 1993). Paralelamente, se observa que el valor medio de cloruro suele ser más alto que el del sulfato, lo cual indicaría una recarga de agua superficial causada por la infiltración de agua de lluvia.

4.2 MAPAS DE ISOCONTENIDOS

a) Datos históricos

En la figura 7 se presentan los mapas de isovalores correspondientes a la conductividad y en la figura 8 el de los bicarbonatos, siendo ambos mapas para el muestreo de 1997. Se ha elegido la conductividad como un indicador del grado de mineralización del agua subterránea y, por otro lado, se ha considerado el bicarbonato por ser el anión mayoritario.

Tabla 2. Características físico-químicas del agua subterránea del Valle de Toluca para la campaña de 1998 (unidades en mg.L⁻¹, excepto conductividad en μS/cm).

Parámetros	A. potable Limite	Año 1998			
		Min	Max	8	D.S.
pH	6.5-8.5	6.3	7.8	6.7	0.3
Conduct.		168	978	342	178
HCO ₃ ⁻		53	223	98	37
SO ₄ ²⁻	400	2	252	19	44
Cl ⁻	250	1	71	7	11
NO ₃ ⁻	43	0.4	68	9	12
Mg ²⁺		4	44	11	8
Ca ²⁺		7	46	13	8
Na ⁺	200	9	45	20	8
K ⁺		2	11	4	2

En el caso de la conductividad, se observa como los valores máximos, superiores a 300 μS cm⁻¹, se encuentran en el área en donde la intensidad de bombeo es mayor. La distribución de estas isolíneas es muy semejante a la que se obtiene cuando se traza el mapa de isocontenidos en bicarbonato, lo cual indica que la mineralización del agua está estrechamente relacionada con la presencia de este ión.

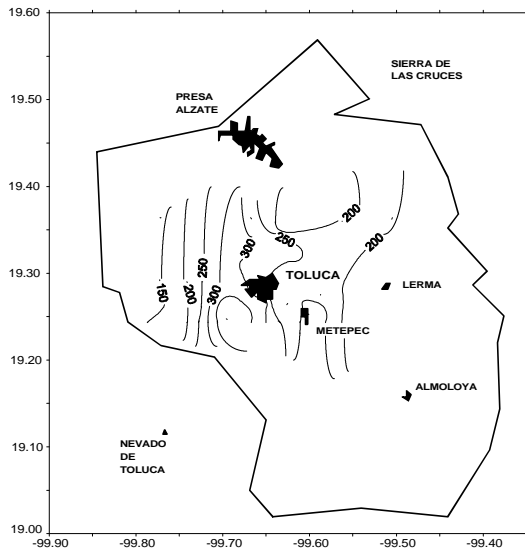


Figura 7. Mapa de isoconductividad. 1997

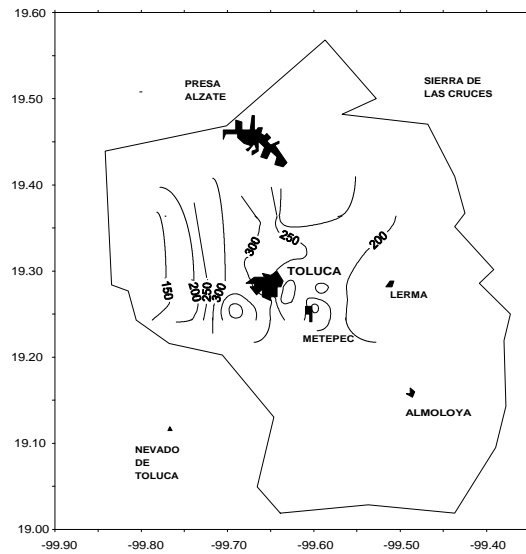


Figura 8. Mapa de isocontenidos en HCO_3^- . 1997

b) Campaña de 1998

Los mapas de isoconductividad y de isocontenidos en ión nitrato para el muestreo de 1998 se presentan en las figuras 9 y 10, respectivamente. En el mapa isoconductividad se puede apreciar como el valor de este parámetro aumenta en la dirección del flujo del agua subterránea indicando el aumento de la salinidad del agua a medida de que ésta recorre una mayor distancia. Los mínimos valores se dan al pie del Nevado de Toluca, por donde se recarga el acuífero, y los máximos en la zona de Lerma – Toluca, donde se dan el mayor descenso del nivel piezométrico.

En el caso del ión nitrato, se observa como las máximas concentraciones se presentan en el sector central del acuífero, donde el grado de explotación es más importante ya que es donde se define el mayor cono de descenso del nivel piezométrico y donde la densidad de actividades antrópicas es más elevada. Esta importante correlación entre estos dos fenómenos y el mayor contenido en nitratos nos indica el origen contaminante de este compuesto químico, cuya presencia está ligada tanto a actividades agrícolas (fertilizantes) como urbanas (aguas residuales). A pesar de esta alta presencia de nitratos en determinados puntos del acuífero, su nivel de concentración es más bien bajo, pues casi todo el acuífero presenta concentraciones inferiores a 20 mg L^{-1} .

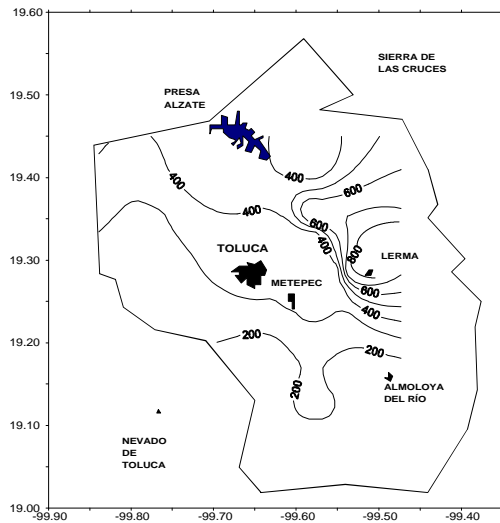


Figura 9. Mapa de isoconductividad. 1998

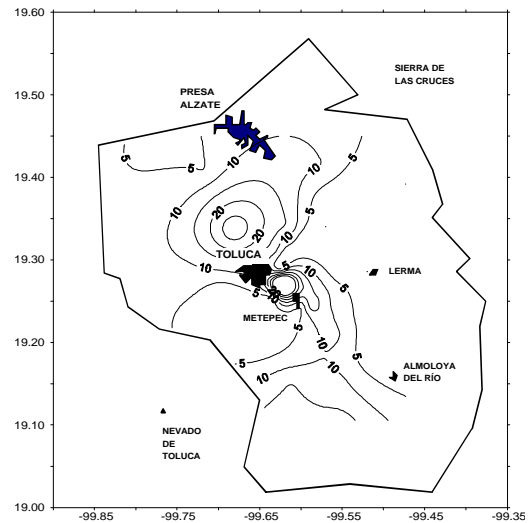


Figura 10. Mapa de isocontenidos en NO_3^- . 1998

4.3. CARACTERIZACIÓN DE FACIES HIDROQUÍMICAS.

a) Datos históricos

La facies hidroquímica del agua subterránea en los acuíferos constituidos por rocas volcánicas suele ser del tipo bicarbonata cálcico-magnesio, en las rocas básicas (basaltos, andesitas), y del tipo bicarbonata cálcico-sódico, en las rocas volcánicas de tipo ácido, como son las traquitas y riolitas (Custodio y Llamas, 1986).

En la figura 11 se presenta el diagrama de Piper correspondiente a la campaña efectuada en 1997. Como rasgo general se puede indicar que el agua subterránea es, fundamentalmente, bicarbonata magnésico-sódica, lo cual está en consonancia con la naturaleza litológica del acuífero. Además de esta facies se observa la existencia de otras tres familias hidroquímicas, aunque con menor representación, que se diferencia en función del tipo de catión predominante. La familia I corresponde a una facies magnésica, la familia II es un agua del tipo magnésica-cálcica y la familia III que presenta una facies sódica-magnésica; apreciándose una continuidad entre las familias hidroquímicas. Esta variabilidad en el tipo de catión predominante puede ser indicativa de un proceso de intercambio iónico entre el sodio y los iones calcio y magnesio.

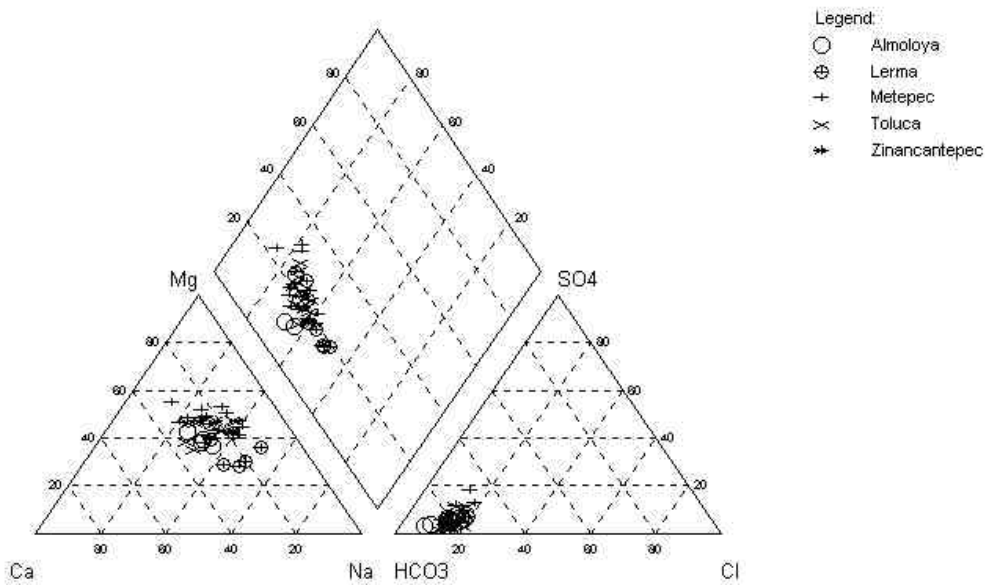


Figura 11. Representación en el diagrama de Piper de las proporciones iónicas de las muestras de 1997

b) Campaña de 1998

La distribución de las muestras dentro del diagrama de Piper (Figura 12), es semejante a la obtenida para las campañas llevadas a cabo en años anteriores, lo cual indica que el quimismo de las aguas subterráneas en esta zona no ha sufrido grandes variaciones con el paso del tiempo.

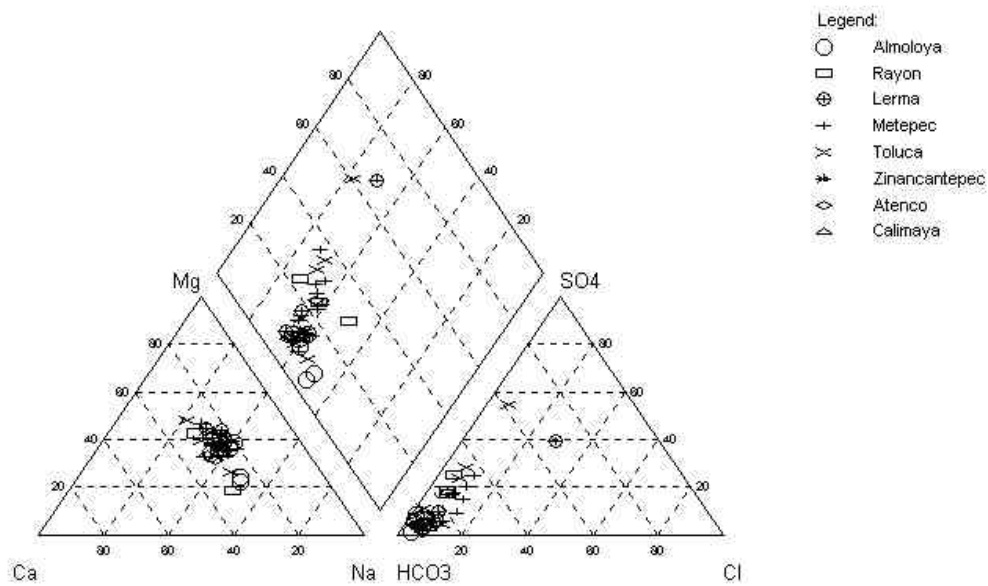


Figura 12. Representación en el diagrama de Piper de las proporciones iónicas de las muestras de 1998

5. METALES PESADOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

En la tabla 3 se presentan los contenidos de Al, As, Ba, Cd, Cu, Cr total, Hg, Pb, Fe, Mn, F y Zn determinados en las muestras recogidas en las campañas de 1993 y 1997 (en la campaña de 1995 no se llevaron a cabo los análisis correspondientes a estos elementos).

Tabla 3. Concentración de metales pesados en el agua subterránea del Valle de Toluca para las campañas de 1993 y 1997 (unidades en mg.L⁻¹).

Parámetros	A. potable	1993				1997			
	Limite	Min	Max	8	D.S.	Min	Max	8	D.S.
Al	0.20					0.030	0.203	0.098	0.038
As	0.05	0.001	0.007	0.004	0.004	0.004	0.051	0.026	0.015
Ba	0.70	0.001	0.102	0.030	0.033	0.001	0.106	0.039	0.036
Cd	0.005	0.001	0.006	0.003	0.002	0.001	0.003	0.001	0.001
Cu	2.00	0.006	0.064	0.022	0.020	0.002	0.075	0.038	0.023
Cr Total	0.05					0.012	0.030	0.021	0.007
Hg	0.001					0.001	0.041	0.002	0.005
Pb	0.025	0.004	0.009	0.007	0.004	0.002	0.018	0.008	0.005
Fe	0.30	0.01	0.10	0.05	0.04	0.01	2.51	0.15	0.39
Mn	0.10	0.01	0.13	0.05	0.05	0.01	0.22	0.03	0.04
F	1.50	0.10	0.25	0.20	0.05	0.02	1.24	0.26	0.19
Zn	5.00	0.010	0.999	0.129	0.326	0.004	0.168	0.047	0.045

El contenido en dichos elementos es heterogéneo, pero en ningún caso se superan los límites vigentes establecidos en México para agua potable a excepción del Fe y Mn. La existencia de todos estos iones está relacionada con los materiales volcánicos que existen en la zona (Custodio y Llamas, 1983; Carrillo, 1994; Huizar-Alvaréz, 1997). En el caso concreto del Fe y Mn no se considera la posibilidad de un origen antrópico ya que sus concentraciones son muy bajas y no parecen estar relacionados con la presencia de ningún otro compuesto químico que indique contaminación.

En las figuras 13 y 14 se presentan los mapas de isovalores correspondientes al hierro y al manganeso para el año 1997. Tanto en el caso del ión Fe como del Mn es posible apreciar como su presencia disminuye en la dirección del flujo de agua subterránea. El comportamiento de ambos iones está controlado por fenómenos de oxidación - reducción, los cuales son especialmente importantes en relación con la solubilización del hierro y también del manganeso, el cual se comporta de forma similar aunque es mucho menos abundante; estos iones se pueden disolver en medios reductores y precipitar con mucha facilidad cuando el medio es oxidante. En el caso del

acuífero del Valle de Toluca se está en presencia de un medio oxidante por lo que el descenso en las concentraciones de ambos iones podría ser debido a fenómenos de precipitación (Custodio y Llamas, 1983; Deutsch, 1997).

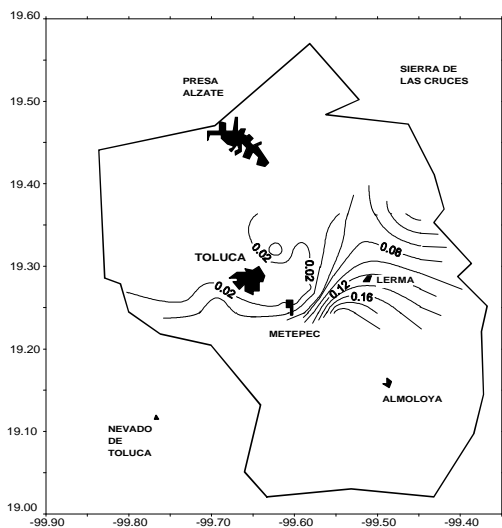


Figura 13. Mapa de isocontenidos en Mn. 1997.

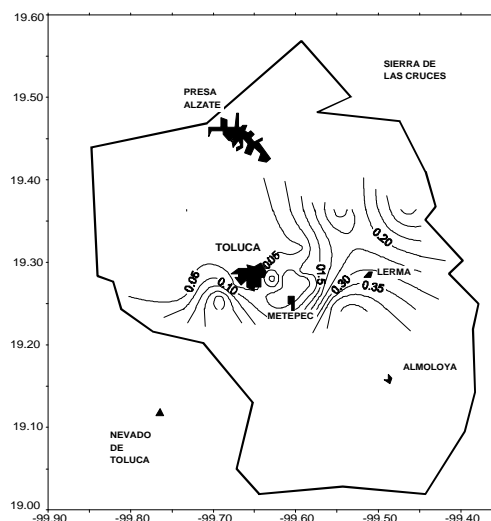


Figura 14. Mapa de isocontenidos en Fe. 1997.

6. CONCLUSIONES

El agua subterránea del acuífero profundo del Valle de Toluca presenta una baja mineralización, con valores de conductividad eléctrica inferiores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El anión más abundante es el bicarbonato y entre los cationes, el magnesio y el sodio. Este quimismo es el resultado de la mezcla de dos aguas, la que procede de los acuíferos volcánicos fracturados que bordean el valle y la del agua de lluvia y riego que se infiltra. Los análisis químicos indican un bajo grado de contaminación; únicamente se encuentran concentraciones superiores a la norma vigente para agua potable en México en el caso del Fe, Mn y nitratos. La presencia de Fe y Mn está relacionada con la mineralogía de las rocas volcánicas que existen en la cuenca por lo que no es necesario invocar un proceso de contaminación antrópica

La existencia de nitratos en concentraciones superiores a 50 mg/l parece indicar cierta contaminación de origen agrícola por el uso de fertilizantes y/ o vertido de aguas residuales.

Finalmente, se puede señalar que, a pesar del alto grado de contaminación que presenta la cuenca, el agua subterránea del acuífero profundo presenta un mínimo grado

de contaminación por efecto de la protección que ejercen los materiales suprayacentes, algunos de los cuales conforman acuitardos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por CONACyT (México) a través del proyecto N° 0391 y por la Universidad Autónoma del Estado de México (Proyecto N° 1067).

BIBLIOGRAFIA

- APHA,AWWA y WPCF (1989) "Standard Methods for the examination water and wastewater", 17th, Edit APHA,AWWA y WPCF. Washington, D.C.
- Appelo, C.A..J. y Postman, D. (1993) "Geochemistry groundwater and pollution" A.A. Balkema. Rotterdam Brookfield.. 536 pp.
- Bisquerra, R. (1989). "Introducción conceptual al análisis multivariante". Publicaciones Universitarias. Barcelona, 2 volúmenes, 808 pp.
- Carrillo, J.J. (1994) "Definición de los mecanismos de contaminación inducida por fluoruro en un acuífero volcánico fracturado en San Luis Potosí, México". In: Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Actas del Congreso. Febrero, Alcalá de Henares (Madrid, España) Tomo I:339-350.
- CCRECRL (Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma) (1993). Atlas Ecológico de la Cuenca Hidrográfica del río Lerma. Gobierno del Estado de México. México. 414 pp.
- Custodio E. y Llamas, J.R. (1983). "Hidrología Subterránea" 2 Tomos. 2ª Edición. Edit. Omega. Barcelona. 2459 pp.
- Davis, J.C. (1986). "Statistics and Data Analysis in Geology" 2ª Edition. John Wiley & Sons. N.Y. 645 pp.
- Demant, Mauvois y Silva (1976). "El eje Neovolcánico Transmexicano". Congreso Latinoamericano de Geología. Instituto de Geología. UNAM. México.
- Deutsch, W.J. (1997) "Groundwater Geochemistry. Fundamentals and Application to Contamination". CRC Press. Boca Raton. Fl. 221pp.
- Díaz-Delgado, C.; Bâ, K.M.; Esteller, M.V. y García-Aragón,, J.A. (1998). "Sistema de Información geográfica para el análisis Geográfico-Hidrológico del Curso Alto del Río Lerma, SIGCARL". UAEM. <http://www.uaem.mx/ceninv/cira/pagweb~1.htm>.

- Herrera, M.E. y Sánchez Zavala, J.L. (1994) "Estratificación y Recursos Minerales del Estado de México" Memoria y mapas. Gobierno del Estado de México. Secretaría de Desarrollo Económico.
- Honorio, R.J. y Hernández, H.F. (1982) "Origen, estratigrafía y petrología de la Cuenca de México y sierras circunvecinas". Tesis profesional. IPN-ESIA-México.
- Huizar-Alvárez, R. (1996) "Hydrochemistry of the aquifers in the Rio Las Avenidas Basin, Pachuca, Hidalgo, México". *Water, Air and Soil Pollution* 96:185-201.
- Lesser y Assoc. (1992) Estudio para el diagnóstico del acuífero del valle de Toluca para implementar la reglamentación de la extracción de agua subterránea". Secretaría de Desarrollo Agrícola. Gobierno de México.
- Madrigal, D. y Llorente, A. (1993) "Distribución y concentración de metales pesados en los mantos freáticos del Valle de Toluca, México". *Anuario de Geografía. Univ. Autónoma del Edo de México* Junio de 1993 N°. 1:2-10.
- Morell, I., Giménez, E. y Esteller, M.V. (1996) "Application of the principal components analysis to the study of salinization on the Castellon Plain (Spain)". *Science of the Total Environment* 177:161-171
- NOM-127-SSA1-1994 "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento que debe someterse el agua para su potabilización". DOF 108-112, 15 de agosto de 1994.
- UNITECNIA, S.A. de C.V. (1996) "Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los Valles de Toluca y Atlacomulco-Ixtlahuaca, en el Edo de México". Comisión Nacional del Agua. 66 pp., planos y anexos.
- Velazquez, L. y Ordaz, A (1994) "Provincias hidrogeológicas de México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Tomo L11.