

**EFFECTOS DE LA EXPLOTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA  
EN EL CURSO ALTO DEL RÍO LERMA**  
EFFECTS OF GROUNDWATER EXPLOITATION IN THE UPPER COURSE  
OF LERMA RIVER

*M.V. Esteller<sup>1</sup>, J.L. Expósito y C. Díaz-Delgado*

Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma del Estado de México; Carretera Toluca-Atzacomulco km 14.5,  
Unidad San Cayetano, C.P. 50200, Toluca, Estado de México;  
<sup>1</sup>e-mail: mvestellera@uaemex.mx

**Abstract**

The aquifer of the Toluca Valley, located in the Mexican Highlands, is subject to intense exploitation to cover essentially the drinking water needs of municipalities in the area, as well as of Mexico-City. This has generated a range of social, economic and environmental effects. The environmental impacts include the drying out of lakes and springs and the decrease of the discharge in rivers. Both processes are associated with the decline of the piezometric level. Moreover, the Toluca Valley has a high population density. The large industrial areas produce high volumes of wastewater. The valley is also an agricultural area, which involves the use of fertilizers and pesticides. Faced with these problems, it is assumed that the aquifer may have some degree of contamination. Hydrogeochemical studies were conducted to test this hypothesis. The groundwater belongs to the sodium-magnesium bicarbonate type. High concentrations of Fe and Mn were detected, indicating an industrial pollution, but low concentrations of other metals suggest that they are of natural origin because the volcanic rocks of the valley show high contents in both ions. In some areas high levels of nitrate were measured what can be associated with the use of fertilizers and / or with the discharge of wastewater.

**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. Esta sobreexplotación ha generado una serie de efectos tanto sociales, económicos como ambientales. En el caso de los efectos

ambientales cabe destacar la desecación de lagunas y manantiales y la disminución de caudales en ríos, ambos procesos ligados al descenso del nivel piezométrico del acuífero. Por otro lado, 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 presenta una facies hidroquímica bicarbonata sódica-magnésica. Así mismo, se detectó la presencia de altos contenidos de Fe y Mn, que sugiere una posible contaminación industrial pero las bajas concentraciones del resto de los metales permiten deducir que el origen de estos dos metales es natural ya que los minerales que conforman las rocas volcánicas tienen altos contenidos en ambos iones. Se detectaron en algunos puntos altos contenidos de nitratos relacionados con el uso de fertilizantes en y/o por vertido de aguas residuales.

## **Introducción**

Los impactos adversos que provoca la sobreexplotación de acuíferos se han podido observar en numerosas partes del mundo. Ejemplos de estos impactos son la desecación de zonas húmedas, la subsidencia, la desaparición de manantiales, el descenso de los caudales base de los ríos y el deterioro de la calidad del agua subterránea, comprobándose también como estos impactos provocan graves problemas medioambientales, así como sociales y económicos<sup>(1, 2)</sup>.

En el caso concreto del deterioro de la calidad del agua, la sobreexplotación sería el origen de diversos procesos que producen cambios en las características del agua subterránea, como son la intrusión marina, la mezcla de aguas superficiales y subterráneas, migración de aguas subterráneas contaminadas y/o altamente mineralizadas desde acuíferos subyacente o suprayacentes al acuífero explotado o el movimiento lateral de plumas de contaminación<sup>(3)</sup>.

En este trabajo se expone un ejemplo de algunos de estos impactos producidos por la explotación del acuífero del Valle de Toluca.

## **Zona de Estudio**

El Valle de Toluca (Figura 1) está localizado en el Altiplano Mexicano, enmarcado en provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico Transmexicano, región constituida por una franja de naturaleza volcánica de tipo calcoalcalino, cuya edad corresponde al Cenozoico. En el valle, se identifican sedimentos lacustres y aluviales que se encuentran intercalados con materiales clásticos de origen volcánico (piroclastos, tobas y brechas); el espesor de esta formación varía desde unos pocos metros en los límites con las sierras hasta valores superiores a los 500 metros en las partes más profundas. A estos depósitos se les asigna una edad Plioceno Tardío – Cuaternario<sup>(4)</sup>.

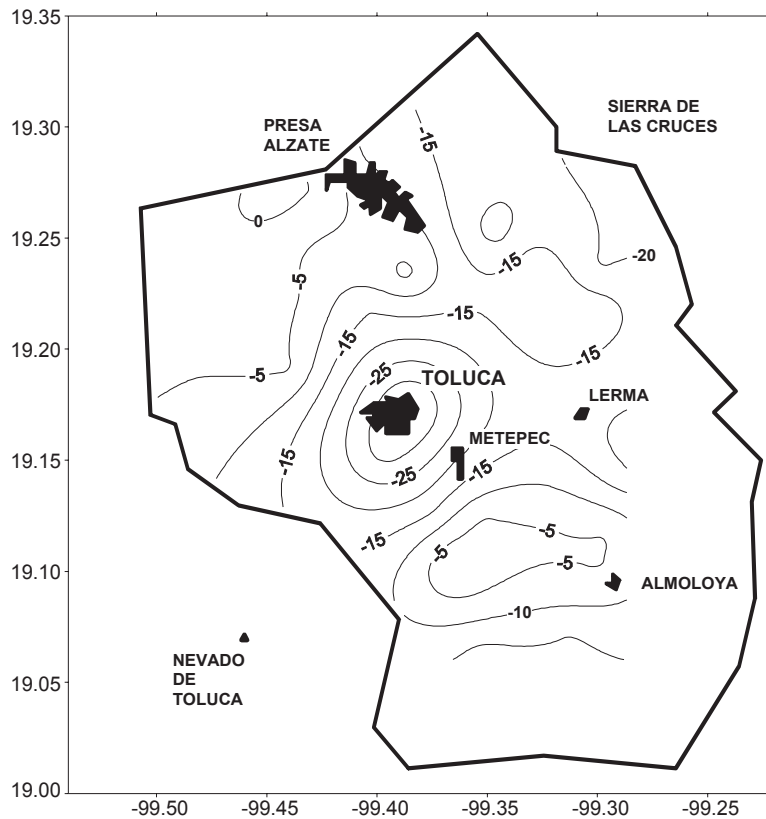
Sobre la base de las características de los materiales detríticos que conforman el acuífero, se puede señalar que este sistema está formado por varios niveles acuíferos superpuestos que constituyen un acuífero multicapa, pero la existencia de cierta continuidad hidráulica permite considerar un sistema de flujo único. No obstante, existen diferencias significativas de carga hidráulica<sup>(5)</sup>.

## **Resultados y Discusión**

### **Hidrodinámica**

El balance hidráulico establecido para el acuífero define unas entradas de 336.7 Mm<sup>3</sup>/año mientras que las salidas se valoran en 383.2 Mm<sup>3</sup>/año, estas salidas se producen fundamentalmente por bombeo, el cual se cuantificó en 329.6 Mm<sup>3</sup>/año, destinándose este volumen en un 88 a uso público-urbano, un 7 a la industria y un 4 a actividades agropecuarias. El balance global indica un desequilibrio entre entradas y salidas, ya que las salidas son superiores a las entradas en 46 Mm<sup>3</sup>/año<sup>(6)</sup>.

El proceso de explotación de las aguas subterráneas queda reflejado en el mapa de isodescensos para el periodo 1971-2006 (Figura 1).



**Figura 1. Mapa de isodescensos en el acuífero del Valle de Toluca en el periodo 1971-2006 (en metros).**

**Figure 1. Map showing the decrease of the water level of the Valle de Toluca aquifer from 1971 to 2006 (in meters)**

En este mapa se aprecia un cono de depresión piezométrica en el área de la Ciudad de Toluca, con un descenso que alcanza los 35 metros, con una tasa promedio de abatimiento de 1.4 m/año. En relación con este importante descenso piezométrico se ha podido constatar, en diferentes zonas de la Ciudad de Toluca, la aparición de grietas o fallas en el terreno, lo cual ha provocado daños en viviendas e infraestructura vial<sup>(7)</sup>.

Otros efectos de la intensa explotación del acuífero ha sido la parcial desecación de las lagunas de Almoloya del Río, las cuales representaban, en un principio, el nacimiento del río Lerma. En el caso de la laguna principal, paso de tener una extensión de 24.3 km<sup>2</sup> en 1970 a 7.8 km<sup>2</sup> en 1989, aunque en la década de los 90 se produjo cierta recuperación<sup>(7)</sup>.

## Hidroquímica

Como rasgo hidrogeoquímico básico de este acuífero se puede señalar su bajos valores de conductividad eléctrica (valor medio 342  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), el predominio de los iones bicarbonato, sodio y magnesio. La mineralización coincide con la que teóricamente debe de tener un agua subterránea en ambiente volcánico; los feldespatos contribuyen con sodio, calcio y potasio, y los piroxenos y biotitas con calcio, magnesio, hierro y manganeso. La presencia de sulfatos y cloruros es baja, debido a que las rocas volcánicas los contienen en poca cantidad<sup>(8)</sup>.

Como ejemplo de las principales características físico-químicas, así como la concentración de elementos tales como Fe y Mn se presentan los datos de la Tabla 1.

Estudios a mayor detalle han permitido comprobar que la intensa explotación del acuífero ha provocado cambios en el quimismo de las aguas subterráneas<sup>(9)</sup>. Inicialmente, en el acuífero se explotaba agua ligada a un flujo local, cuyo origen estaría relacionado con la recarga del acuífero por infiltración de agua de lluvia y por alimentación lateral desde los acuíferos fracturados de borde, los cuales están constituidos por basaltos y andesitas. Esta agua se caracteriza por ser de tipo bicarbonatado magnésico.

Con el paso del tiempo y debido al descenso del nivel piezométrico, se ha incorporado al acuífero un flujo regional, el cual está ligado a materiales de tipo riolítico que se encuentran a gran profundidad. Este flujo regional se caracteriza por aguas de tipo bicarbonatado sódico, así como por altos contenidos de potasio, mayor salinidad y altas temperaturas.

A la par que este cambio en la salinidad del agua subterránea, se ha producido un incremento en el contenido de nitratos, los cuales tienen su origen en el uso de fertilizantes en las áreas agrícolas. También se han podido detectar altos contenidos de sulfato en los sondeos de menor profundidad, en relación con el uso de sulfato de amonio como fertilizante.

La presencia de Fe y Mn parece estar relacionada con la mineralogía de las rocas volcánicas por lo que no es necesario invocar un proceso de contaminación antrópica.

**Tabla 1. Características físico-químicas del agua subterránea del Valle de Toluca**

**Table 1. Physico-chemical characteristics of groundwater in the Valley of Toluca**

| Parámetros                      | Agua potable | Valores en mg/L |      |      |       |
|---------------------------------|--------------|-----------------|------|------|-------|
|                                 |              | Limite          | Min  | Max  | Media |
| pH                              | 6.5-8.5      | 6.3             | 7.8  | 6.7  | 0.3   |
| Conductividad eléctrica (µS/cm) |              | 168             | 978  | 342  | 178   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>   |              | 53              | 223  | 98   | 37    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>   | 400          | 2               | 252  | 19   | 44    |
| Cl <sup>-</sup>                 | 250          | 1               | 71   | 7    | 11    |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>    | 43           | 0.4             | 68   | 9    | 12    |
| Mg <sup>2+</sup>                |              | 4               | 44   | 11   | 8     |
| Ca <sup>2+</sup>                |              | 7               | 46   | 13   | 8     |
| Na <sup>+</sup>                 | 200          | 9               | 45   | 20   | 8     |
| K <sup>+</sup>                  |              | 2               | 11   | 4    | 2     |
| Fe                              | 0.30         | 0.01            | 2.51 | 0.15 | 0.39  |
| Mn                              | 0.15         | 0.01            | 0.22 | 0.03 | 0.04  |

## Conclusiones

El agua subterránea del acuífero profundo del Valle de Toluca presenta una baja mineralización. 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 aunque con el tiempo se ha incorporado un flujo regional con mayor salinidad, mayores temperaturas y altos contenidos en potasio.

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.

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.

### **Referencias bibliográficas**

- (1) Simmers I., Villarroya F., Rebollo L.F., 1992: Selected papers on aquifer overexploitation. Verlag Heinz Heisa, Hannover/Germany.
- (2) Llamas R., Custodio E., 2003: Intensive use of groundwater - Challenges and opportunities. A.A. Balkema Publishers, Lisse.
- (3) Vrba J., 2003: The impact of aquifer intensive use on groundwater quality. In: Llamas R., Custodio E. (eds.), Intensive use of groundwater - Challenges and opportunities. A.A. Balkema Publishers, Lisse. pp. 113-132.
- (4) Herrera M.E., Sánchez J.L., 1994: Estratificación y recursos minerales del Estado de México - Memoria y mapas. Gobierno del Estado de México. Secretaria de Desarrollo Económico.
- (5) 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.
- (6) CNA, 2002: Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Toluca, Estado de México. Comisión Nacional del Agua. México.
- (7) Esteller M.V., Díaz-Delgado C., 2002. Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the highlands of Mexico. Environ. Management 29 (2), 266-278.
- (8) Appelo C.A..J., Postman D., 1993: Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield. 536 pp.
- (9) Esteller M.V., Andreu J.M., 2005: Anthropogenic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (Central Mexico). Hydrogeol. J. 13, 378-390.