

Explotación intensiva del acuífero del Valle de Toluca: análisis de algunos efectos económicos- ambientales

M. V. Esteller, J. L. Expósito, C. Díaz Delgado, J. Paredes, C. R. Fonseca
Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA), Universidad Autónoma del
Estado de México (UAEM)

Resumen

La indiscutible importancia de las aguas subterráneas en México está reflejada en el hecho de que el 50% del total del agua utilizada en la industria y el 70% del abastecimiento humano provienen de los acuíferos. Además, el mayor porcentaje (80%) de las extracciones de agua subterránea se destina a la agricultura. La necesidad de cubrir toda esta demanda ha dado lugar a una intensa explotación de los acuíferos con sus consiguientes impactos. En el presente trabajo se exponen algunos de estos impactos en uno de los acuíferos del Altiplano Mexicano, el correspondiente al Valle de Toluca. En particular, se estudiaron el efecto económico ocasionado por un mayor consumo de energía al tener que bombear agua a mayores profundidades a causa del descenso del nivel piezométrico y el impacto provocado por la aparición de agrietamientos originados por subsidencia de terreno.

El impacto de los agrietamientos en el acuífero se valoró a través del estudio de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación. La vulnerabilidad determinada con el método SINTACS, con ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG) desarrollado en ArcSIG ha mostrado el aumento del grado de vulnerabilidad (de Bajo a Alto) en áreas donde se identificaron los agrietamientos

Para dimensionar el impacto económico por abatimiento del nivel piezométrico se elaboraron mapas de curvas de isocostes, esta vez con el paquete informático IDRISI, que permitieron apreciar que la región más susceptible a incrementar los costes por bombeo es la zona centro (donde se localiza la ciudad de Toluca) mientras que en la zona poniente del acuífero se tiene la mayor tendencia a ahorros energéticos y por tanto de costes.

Palabras clave:

acuífero.
explotación.
impacto económico.
agrietamientos.
vulnerabilidad.

Introducción

El desarrollo de cualquier país está estrechamente vinculado con la disponibilidad de agua que éste posea tanto en cantidad como en calidad. Esta disponibilidad, en muchas ocasiones, está ligada con el aprovechamiento de acuíferos, por lo que, a escala mundial, los acuíferos están experimentando una creciente explotación así como una continua amenaza de contaminación causada por factores antrópicos (Foster *et al.*, 2002).

Un ejemplo de la importancia de las aguas subterráneas en el desarrollo de un país es el caso de México, en donde el 70% del agua que se utiliza en abastecimiento humano procede de los acuíferos (al menos 75 millones de personas depende de este recurso), cerca de la mitad de la industria del país también se abastece de este recurso y el 80% de las extracciones de agua subterránea se destina a la agricultura. Sin embargo, la intensa explotación de los acuíferos se ha presentado de tal forma que 101 de los 653 acuíferos reconocidos se han considerado administrativamente como “acuíferos sobreexplotados” (CONAGUA, 2010). Esta explotación intensiva ha generado una serie de impactos tanto sociales, económicos como ambientales en estos acuíferos (Carrillo-Rivera *et al.*, 2008; Esteller *et al.*, 2011).

A manera de ejemplo, se puede citar el caso del acuífero del Valle de Toluca, el cual se ubica en una región que ha experimentado un crecimiento urbano importante a partir de la segunda mitad del siglo pasado (Orozco, 2006), en gran medida, impulsado por el desarrollo industrial que ha promovido el gobierno estatal mediante políticas

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

de inversión (Orozco y Sánchez, 2004). En esta zona se asientan 3 438 empresas que han promovido el incremento en el número de habitantes a lo largo de las últimas cinco décadas. En el más reciente censo demográfico (INEGI, 2010), la población asentada en la zona ascendió a 1.7 millones de habitantes.

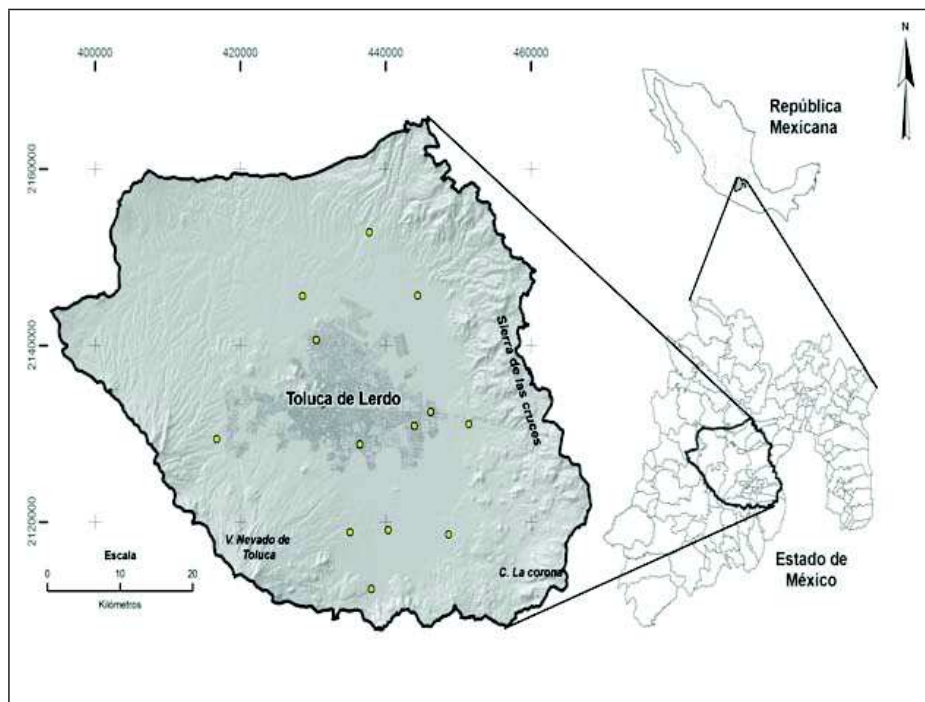
El incremento en las actividades económicas y de población ha traído consigo un aumento de las necesidades de agua que se cubren, casi en su totalidad, con aguas subterráneas. A este hecho, hay que añadir la exportación de agua subterránea desde éste y su valle vecino (Valle de Ixtlahuca-Atlacomulco) hacia la Ciudad de México y área metropolitana para cubrir su demanda, lo cual representa un caudal promedio de $5.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y con valores que han llegado a alcanzar los $14.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Birkle *et al.*, 1998).

En este acuífero ya se han estudiado algunos impactos directos que se han generado por la explotación del acuífero como son: la desecación de las Lagunas de Almoloya del Río, la disminución del caudal base en el Río Lerma, la aparición de agrietamientos (Esteller y Díaz-Delgado, 2002), la subsidencia del terreno (Calderhead *et al.*, 2011) y los cambios en la calidad del agua (Esteller y Andreu, 2005; Jiménez-Moleón *et al.*, 2010; Esteller *et al.*, 2011). Otros impactos que han sido ignorados hasta el momento son el aumento de los costes económicos por extraer el recurso hídrico desde niveles cada vez más profundos (Salameh, 2008) y el aumento de la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas asociado a los agrietamientos, los cuales representan flujos preferenciales de entradas de contaminantes y en algunos casos, causantes de roturas en redes de drenaje (Mejía *et al.*, 2007; Orozco y Figueroa, 1991). Teniendo en cuenta que estos trascendentes impactos no han sido evaluados en el acuífero del Valle de Toluca, ello constituye el objetivo principal del desarrollo de este trabajo de investigación.

Generalidades del acuífero del Valle de Toluca

El Valle de Toluca se encuentra en la región conocida como Altiplano Mexicano, en la parte central del país, con una altitud promedio de 2 570 msnm (Fig. 1.1). El clima es templado-semifrío, con precipitaciones anuales de 700 mm, las cuales acontecen entre mayo y octubre.

Figura. 1.1 Localización del acuífero del Valle de Toluca (AVT), México



Fuente: elaboración propia.

Desde un marco geológico, el Acuífero del Valle de Toluca se ubica en la provincia fisiográfica denominada Sistema Volcánico Transversal, región constituida por una franja de naturaleza volcánica cuya edad corresponde al Cenozoico. La secuencia litológica está constituida por andesitas y riolitas del Oligoceno, andesitas del Mioceno, basaltos y andesitas del Cuaternario, así como por materiales piroclásticos y brechas; los cuales afloran en las sierras que circundan el valle. En la zona baja, 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. A estos depósitos se les asigna una edad Plioceno Tardío – Cuaternario (Herrera y Sánchez, 1994). Estos materiales detríticos reposan sobre un zócalo constituido por material volcánico consolidado cuya naturaleza litológica es variable.

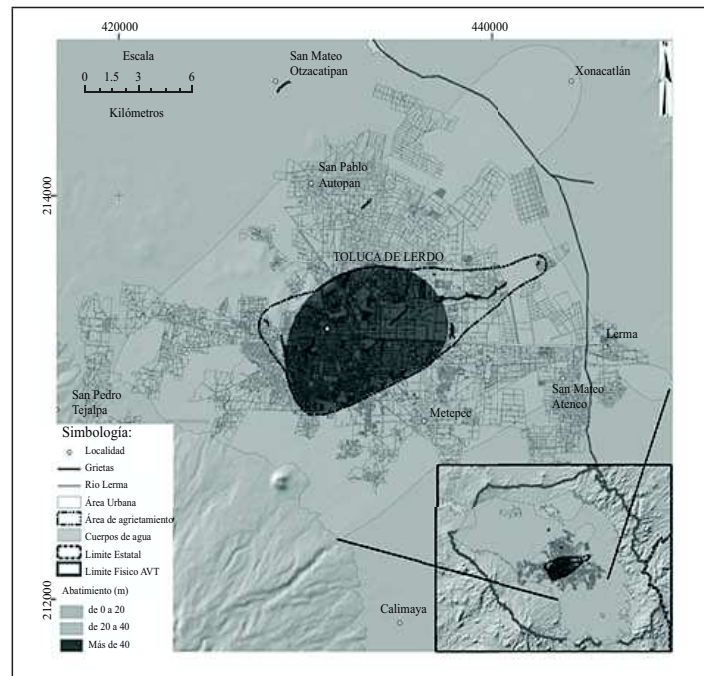
Los parámetros hidráulicos del acuífero abarcan un amplio rango debido a la variabilidad litológica y geométrica de los depósitos. Sin embargo, es posible mencionar que los valores de conductividad hidráulica están comprendidos entre 4 y 80 m día⁻¹ y el coeficiente de almacenamiento oscila entre 0.3 y 0.9% (CCRECRL, 1993).

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

El balance hidráulico que se ha establecido para el acuífero define unas entradas totales de $337 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ mientras que las salidas se valoran en $489 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, estas salidas se producen fundamentalmente por bombeo, el cual se cuantificó en $463 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$, destinándose este volumen en un 88% a uso público-urbano, un 7% a la industria y un 4% para cubrir la demanda agropecuaria. El balance global del acuífero indica un desequilibrio entre entradas y salidas, ya que las salidas son superiores a las entradas en $152 \text{ hm}^3 \text{ año}^{-1}$ (CONAGUA, 2009).

El proceso de explotación de las aguas subterráneas está reflejado en el mapa de isodescensos para el periodo 1976-2006 (Fig. 1.2). En este mapa se aprecia un cono de depresión piezométrica en el área de la Ciudad de Toluca, con un descenso que alcanza los 40 metros y una tasa promedio de abatimiento de 1.4 m año^{-1} . En relación con este importante descenso piezométrico se ha podido constatar la aparición de un fenómeno de subsidencia, cuyos primeros efectos (Paredes, 2010; Esteller y Díaz-Delgado 2002) se detectaron en 1985 con la aparición de numerosas grietas que son identificables en diferentes áreas de la zona metropolitana de Toluca (Fig. 1.2).

Figura. 1.2 Mapa de descenso del nivel piezométrico (periodo 1976-2006) y agrietamientos en el acuífero del Valle de Toluca



Fuente: elaboración propia con datos de Muñoz (2008).

Materiales y métodos

Vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea

El método SINTACS desarrollado en Italia (Civita y De Maio, 2004) fue elegido para evaluar la vulnerabilidad de acuífero por efecto de la contaminación a través de un índice bajo el mismo nombre. El acrónimo SINTACS representa a los siguientes parámetros (Marsico *et al.*, 2004):

S: *Soggioacenza*. Profundidad del agua subterránea.

I: *Infiltrazione*. Infiltración eficaz.

N: *Effecto depurante del non saturo*. Efecto autodepurador de la zona no saturada.

T: *Tipologia della copertura*. Tipo de suelo.

A: *Acquifero*. Litología del acuífero.

C: *Conducibilità idraulica*. Conductividad hidráulica.

S: *Acclività della superficie topografica*. Pendiente de la superficie topográfica.

Para la valoración de este índice, se asigna una puntuación (indicada con el subíndice “r”) de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad) a cada parámetro y se pondera cada uno con un peso (indicado con el subíndice “w”) de 1 a 5, para obtener una valoración final según la ecuación 1.

$$\text{SINTACS} = (S_r \cdot S_w) + (I_r \cdot I_w) + (N_r \cdot N_w) + (T_r \cdot T_w) + (A_r \cdot A_w) + (C_r \cdot C_w) + (S_r \cdot S_w) \quad (1)$$

Para la obtención de las ponderaciones de cada variable se asignan los pesos *w* en función de la situación real del área de estudio que más se aproxime a uno de los siguientes escenarios (Civita y De Maio, 2004):

- Ordinario.
- Fuentes difusas de contaminación potencial.
- Drenaje de cuerpos hídricos superficiales.
- Karstificación profunda.
- Roca volcánica fisurada.

A pesar de que el método SINTACS considera el agrietamiento homogéneo de las rocas volcánicas, no toma en cuenta el agrietamiento en materiales detríticos, fenó-

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

meno común en el Valle de Toluca. En los últimos años las discusiones alrededor de los métodos de vulnerabilidad se han centrado en el análisis de ciertos factores que pueden modificar dicha vulnerabilidad, uno de estos factores son los agrietamientos del terreno, los cuales pueden actuar como rutas de flujo preferenciales para algún contaminante (Bense *et al.*, 2003).

Para considerar el efecto de los agrietamientos en el mapa SINTACS se decidió trazar un área de afectación, en lugar de considerar las grietas de forma vectorial, ya que según lo señalado por Carreón *et al.* (2006), las grietas que se forman por abatimiento del agua subterránea tienden a generar grietas secundarias cercanas a ellas o que se unen a la grieta principal conformando una zona de afectación.

Para la elaboración del mapa de vulnerabilidad SINTACS, en primer término, se obtuvieron, a partir de un proceso de rasterización, los insumos cartográficos requeridos: de manera directa para los mapas geológico, edafológico, de precipitación y de infiltración, y por medio de interpolación los niveles topográficos y piezométricos.

Posterior a ello, se asigna un puntaje a cada mapa obtenido según las gráficas establecidas por Civita y De Maio (2004) para cada parámetro del método SINTACS, para entonces aplicar el valor de ponderación. El mapa resultante es una suma ponderada que, en general, abarca un rango de valores que oscila entre 26 a 260. En el caso de la presente investigación los valores obtenidos no cubren todo ese espectro, por lo tanto fue necesario normalizar los datos para llevarlos a una escala de 0 a 100; donde 26 corresponde a 0 y 260 corresponde a 100, para así poder jerarquizar los valores de vulnerabilidad por medio de la ecuación 4 (Mejía, 2007).

$$IS_{NO} = \frac{(IS_C - IS_{MIN}) (100)}{IS_{MAX} - IS_{MIN}} \quad (2)$$

donde:

- IS_{NO} = Índice normalizado.
- IS_C = Valor de cada celda.
- IS_{MAX} = Valor máximo del índice SINTACS.
- IS_{MIN} = Valor mínimo del índice SINTACS.

Una vez normalizados los valores, fue posible jerarquizar el índice de vulnerabilidad como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Jerarquización de los valores del índice de vulnerabilidad normalizados (ISNO)

<i>Rango del IS_{NO}</i>	<i>Vulnerabilidad</i>
0 - 24	Muy baja
25 - 35	Baja
36 - 49	Media
50 - 69	Alta
70 - 79	Muy alta
80 - 100	Extremadamente alta

Fuente: Mejía, 2007.

Una vez que se georeferenciaron los agrietamientos de la zona, y con la finalidad de determinar en qué medida la presencia de los agrietamientos afecta a la infiltración, se realizaron mediciones de la velocidad de infiltración del agua, con el método de doble cilindro, en seis grietas en diferentes zonas del área de estudio (Fig. 1.2). Adicionalmente, se hicieron dos mediciones de infiltración sobre terreno adyacente que no ha sido afectado por los agrietamientos, esto con el objetivo de realizar una comparación entre las velocidades de infiltración ante distintos escenarios.

Con base en los resultados, se definió un área de afectación donde existe una mayor concentración de agrietamientos y que coinciden con los valores de mayor descenso del nivel piezométrico del acuífero (Fig. 1.2). Esta área se consideró como una zona donde los valores del efecto de autodepuración de la zona no saturada (N) y de suelo (T) aumentaron significativamente en la ecuación del método SINTACS (lo que representa mayor vulnerabilidad).

Finalmente, con base en una adición matricial se obtuvo el mapa de vulnerabilidad incluyendo los agrietamientos.

Costos de extracción del agua subterránea

La mayor parte de los costos de extracción de agua subterránea está representada por el consumo de energía (Hsiao y Chang, 2002). Este consumo de energía depende de la carga hidráulica y de la localización del aprovechamiento debido a la variación en las características hidrogeológicas y la influencia de los conos de abatimiento.

Con base en la conocida expresión para estimar la potencia $P = \gamma Q H \eta^{-1}$ requerida para elevar un caudal Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) de peso específico γ (Kg m^{-3}) desde una carga hi-

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

dráulica H (m) con eficiencia η (MacDonald *et al.*, 2009), es posible tanto estimar el consumo energético en la extracción de agua subterránea como determinar las zonas más susceptibles a incrementar su consumo energético.

El nivel piezométrico de un acuífero puede funcionar como un indicador espacial y temporal del consumo energético debido a que es el elemento más relevante en la carga hidráulica. De esta manera, el comportamiento del nivel piezométrico proporciona las bases de la siguiente serie de pasos que conforman un método para la estimación del impacto energético en el aprovechamiento de las aguas subterráneas: 1) Construcción de isocurvas de la variación media anual del nivel piezométrico. 2) Localización y estimación de consumos energéticos. 3) Definición de características homogéneas de operación. 4) Estimación de la intensidad de extracción. 5) Construcción de isocurvas de consumos energéticos.

En la primera etapa se seleccionó la amplitud de los intervalos de tiempo donde es posible identificar valores constantes en el nivel piezométrico con el objetivo de construir isocurvas que representen su variación media anual. De esta manera, en la segunda etapa se estimó el consumo energético P_{var} (W) causado por la variación del nivel piezométrico (ecuación 2) para cada uno de los pozos de extracción considerando a como la variación media anual de dicha variación en un periodo de n años (Fonseca *et al.*, 2010).

$$P_{var} = \frac{\gamma Q}{\eta} \Delta h \left(\frac{n(n+1)}{2} \right) \quad (3)$$

Los consumos energéticos estimados en la etapa 2 son de tipo puntual por lo que para efectuar un análisis espacial que llevo a cabo la interpolación y rasterización de los datos por medio del paquete informático IDRSI. Para extrapolar los posibles consumos energéticos presentados en la zona de estudio fue necesario homogeneizar las características de operación en la extracción de agua (etapa 3) a través de una “bomba tipo” con el mayor caudal de extracción encontrado en el periodo analizado y del tipo y potencia nominal de motor con válvulas y accesorios que con mayor frecuencia se encuentra instalada en el acuífero. De esta manera, en la cuarta etapa se estimó la intensidad de bombeo para cada pozo (ecuación 3) por medio de los días al año que están activos (d.a.) teniendo en cuenta el volumen potencial V_{ext} ($m^3 \text{ año}^{-1}$) que puede extraer la bomba tipo con la potencia nominal asignada, el volumen real extraído del pozo V_{con} ($m^3 \text{ año}^{-1}$) y el gasto G_{BT} ($m^3 \text{ s}^{-1}$) establecido para la bomba tipo.

$$\text{d.a.} = 365 - (V_{ext} - V_{con})(86400 G_{BT})^{-1} \quad (4)$$

Finalmente, fue posible interpolar y construir las isocurvas de consumo energético que representan las zonas más susceptibles a incrementar el consumo energético por extracción de agua subterránea (etapa 5).

Resultados y discusión

Impacto en la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero

La evaluación de la vulnerabilidad con el método SINTACS mostró los escenarios de impacto ordinario e impacto notable, es decir, las zonas boscosas que no tienen algún impacto notable por actividades antrópicas (zona del Nevado de Toluca y la Sierra de las Cruces) y las áreas (planicie del valle) adaptadas a actividad antropogénica extensiva como cultivos que presentan tratamiento con mejoradores de suelo y abonos químicos, vertido de aguas residuales, áreas de descarga incontrolada, colectores, áreas industriales activas y áreas urbanizadas.

El escenario de impacto notable abarca el 70.27 % del área de estudio, mostrando de este modo que en la mayor parte del acuífero, donde existe alguna actividad antropogénica, tiene impacto sobre el territorio representado en el mapa de vulnerabilidad SINTACS con un rango de valores que varía entre 45 y 180, siendo 180 el valor de más alta vulnerabilidad.

El mapa SINTACS normalizado de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Valle de Toluca (Fig. 1.3) destaca las zonas con más altos niveles de vulnerabilidad del acuífero: a) la región sur, relacionada principalmente con el pie de monte del Nevado de Toluca; y b) a partir de Tenango de Arista hacia el oriente, llegando a las laderas de la Sierra de Las Cruces y hasta Ocoyoacac. En las partes más altas de la Sierra de Las Cruces, el índice de vulnerabilidad es muy bajo, lo cual se debe principalmente a las características de las unidades geológicas aflorantes; sin embargo se observan algunas áreas en el piedemonte con vulnerabilidad media en el noreste del acuífero, desde la presa José Antonio Alzate y abarcando la zona de Temoaya.

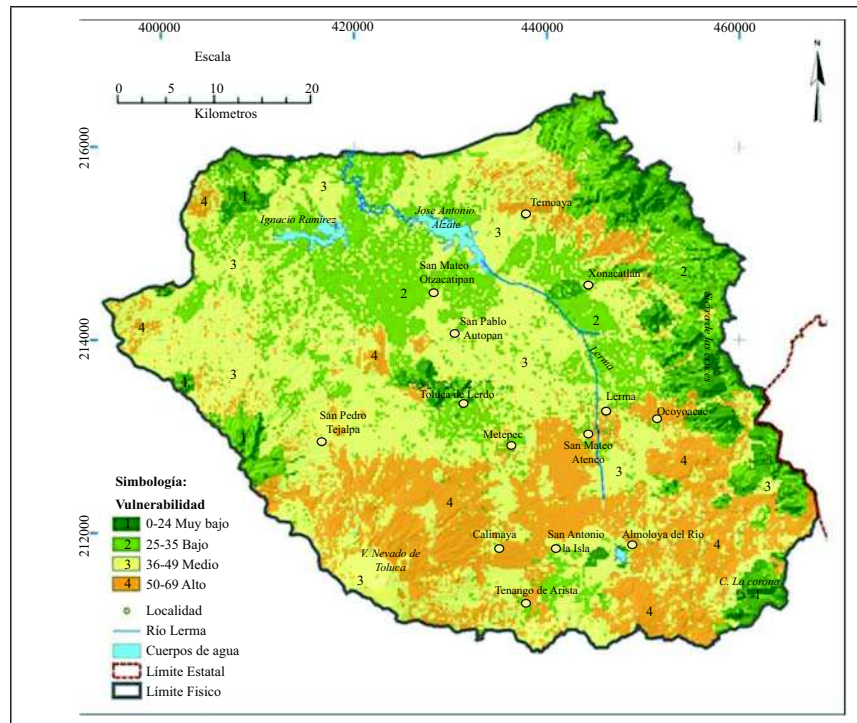
En la planicie del valle (área central del acuífero) y el área montañosa que está al noroeste de la Ciudad de Toluca, el índice de vulnerabilidad es bajo, y se observan áreas de muy baja vulnerabilidad, particularmente en la zona lacustre al norte de Lerma y que sigue el trayecto del río del mismo nombre.

La vulnerabilidad del acuífero del Valle de Toluca, en líneas generales, oscila entre baja y media con los siguientes porcentajes: muy baja 8.23%, baja 24.92%, media

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

43.13%. Sin embargo se subraya que las zonas de alta vulnerabilidad representan un 23.7% de la zona de estudio y se concentran al sur de Ocoyoacac, al sur de Almoloya del Río y al norponiente de Toluca.

Fig. 1.3 Mapa de vulnerabilidad del acuífero del Valle de Toluca, con base en el método SINTACS normalizado.



Fuente: elaboración propia.

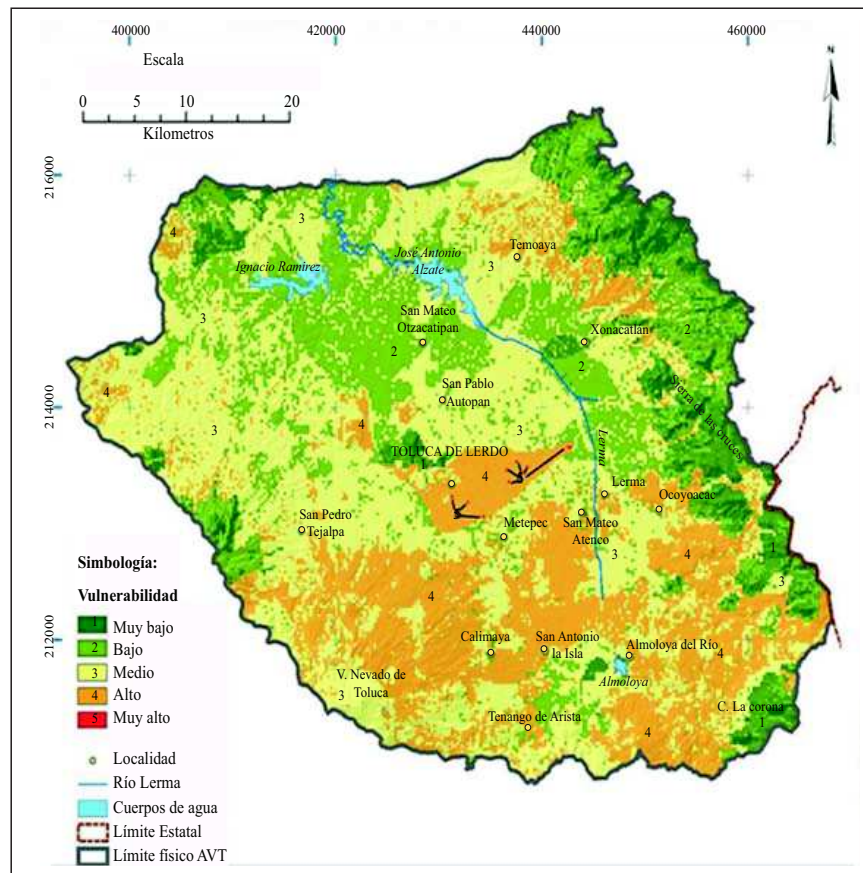
En los agrietamientos que afectan en mayor grado la vulnerabilidad del acuífero (Fig. 1.2) se determinó la velocidad de infiltración, lo cual permitió comprobar que los valores promedio de las mediciones realizadas sobre las grietas son mayores a los valores de las mediciones hechas sobre el terreno que no ha sido afectado por los agrietamientos. Se estimó, por ejemplo, que en la grieta de San Pedro Totoltepec, la velocidad es de $1.5 \times 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ y en la grieta ubicada en la Estancia Infantil Margarita Maza, la velocidad es de $3.9 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ (González y Munguía, 2009). Con base en estos datos se consideró aumentar a 8 el valor de los parámetros efecto de autodepuración de la zona no saturada (N) y tipo de suelo (T) del método SINTACS en la zona definida

como de influencia de los agrietamientos, ya que el tiempo de tránsito de un líquido tiende a ser mucho menor cuando pasa por una grieta.

Con estos fundamentos, se obtuvo el mapa de vulnerabilidad SINTACS del acuífero del Valle de Toluca modificado mediante la consideración de las zonas de agrietamientos. El resultado final se muestra en la Fig. 1.4.

Para determinar el estado del acuífero en términos de vulnerabilidad y estimar la diferencia entre el mapa de vulnerabilidad SINTACS (Fig. 1.3) y el mapa de vulnerabilidad SINTACS modificado (Fig. 1.4), se realizó una comparativa del área abarcada por cada valor del índice de vulnerabilidad, cuyo resultado se presenta en la Tabla 1.2. En dicha tabla se observa que los índices para ambos mapas que tienen mayor extensión en el acuífero son “Bajo” y “Medio”, con un porcentaje de área cubierta que oscila entre el 24 y 43 %.

Fig. 1.4 Mapa de vulnerabilidad SINTACS modificado del acuífero del Valle de Toluca considerando los agrietamientos.



Fuente: elaboración propia.

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

Tabla 1.2 Superficie según valores del índice de vulnerabilidad de los mapas SINTACS y SINTACS modificado

<i>Índice vulnerabilidad</i>	<i>SINTACS</i>		<i>SINTACS modificado</i>	
	<i>km2</i>	<i>%</i>	<i>km2</i>	<i>%</i>
Muy bajo	227.5	8.23	223.1	8.07
Bajo	688.6	24.92	661.9	23.95
Medio	1191.6	43.13	1165.6	42.19
Alto	654.9	23.70	711.4	25.75
Muy alto	-	-	0.62	0.02

Fuente: elaboración propia.

El área con menor cobertura en el acuífero corresponde el índice “Muy bajo”, con un porcentaje del área cubierta del 8.23 % en el mapa *SINTACS* y 8.07 % en el mapa *SINTACS* modificado (Tabla 1.2), áreas que se encuentran principalmente en la zona alta de la Sierra de las Cruces y la zona lacustre del centro del valle.

Un área que corresponde al índice “Alto”, abarca un 23.7 % del área total del mapa *SINTACS* y aumenta a un 25.75 % después de la consideración de la zona de influencia del agrietamiento. Con base en esta información, se observa un aumento en el área de “Alto” índice de vulnerabilidad de 56.5 km², en una zona que tenía un índice de vulnerabilidad “Medio” y “Bajo”.

Se debe tomar en cuenta que este aumento tiene lugar en la zona de mayor concentración urbana del área de estudio, factor que puede incidir directamente en el incremento del peligro de contaminación ya que en estas zonas urbanas se pueden identificar un gran número de focos contaminantes que pueden generar el deterioro de la calidad del agua subterránea (Naik *et al.*, 2008)

El análisis comparativo entre las características físicas (geología, suelo y topografía) del área donde se define la zona de agrietamiento y el área cercana que no ha sido afectada por grietas permite concluir que no hay diferencias significativas de estas características por lo que es posible que se produzca una propagación de la zona de agrietamientos hacia el resto del centro del valle en el caso de que la zona de mayor abatimiento del nivel del agua subterránea continúe expandiéndose. Sin embargo, no se descarta la presencia en el futuro de estos fenómenos en otras áreas cercanas, o que incluso ya estén presentes, pero que aún no se tiene un registro.

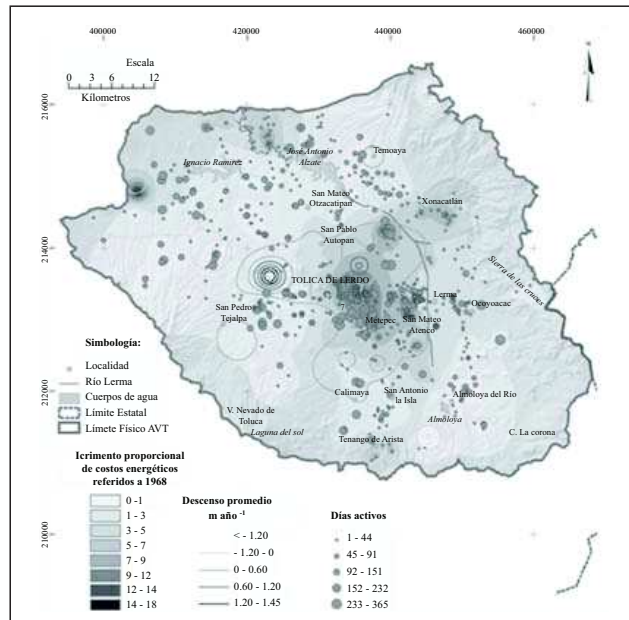
Impacto económico por abatimiento del nivel piezométrico

Para la construcción de las isocurvas de variación media anual del nivel piezométrico se consideró un periodo de 7 años comprendidos entre 1999 y 2006 con información proveniente de una red de 65 piezómetros (CONAGUA, 2006). La interpolación de los niveles piezométricos proporciona la carga hidráulica mínima en el consumo energético que difiere de la real de acuerdo con la distancia encontrada entre el punto de lectura y el radio de influencia de los conos de abatimiento provocados por los pozos de extracción.

La información sobre las características de operación en la extracción de agua subterránea por medio de 762 pozos fue proporcionada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2006) y contenía, además de la posición geográfica, los caudales, diámetros, usos y niveles estáticos y dinámicos de explotación; datos todos ellos necesarios para la estimación del consumo energético total.

La interpolación para la construcción de las isocurvas de consumo energético no fue factible hasta la estandarización de las características de operación para la extracción de agua. Para ello, el caudal de extracción y la potencia nominal de la bomba tipo considerada en este caso fueron de 42 L s⁻¹ y 50 HP, respectivamente.

Fig. 1.5 Impacto energético (1968-2006) e intensidad de actividad en la extracción de agua subterránea en el acuífero del Valle de Toluca (1999-2006)



Fuente: elaboración propia.

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

La Fig. 1.5 muestra el abatimiento medio anual en el periodo 1999-2006 presentado en el acuífero del Valle de Toluca y su relación con las zonas que han sufrido mayor impacto por medio del incremento proporcional (adimensional) del consumo energético por operación respecto a 1968. Además, se observa la intensidad en la actividad de cada pozo de extracción cuyo costo de operación anual en términos monetarios se estimó en, aproximadamente, USD \$3,642,000 con base en la tarifa de energía eléctrica establecida para 2006.

Es importante resaltar que de acuerdo con cifras oficiales, el trasvase de agua extraída del acuífero del Valle de Toluca hacia el Distrito Federal, hoy en día, representa el 34% de la extracción total, pero que en 2006 alcanzó valores mayores del 102% de la extracción actual. Dado que en la cuenca cedente no se han visto reflejadas las inversiones externas para resarcir los efectos generados, como los aquí presentados, es inevitable la necesidad de políticas públicas que al menos procuren una protección o mejora a los recursos hídricos remanentes.

Conclusiones

Los impactos que afectan a los acuíferos sometidos a una intensa explotación son de muy diversa índole, algunos de estos impactos han sido poco estudiados y menos aún evaluados. Es el caso del impacto que puede generar la aparición de agrietamientos que se convierten en vías preferenciales de entrada de contaminantes al acuífero. Para evaluar este impacto se determinó el índice de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero del Valle de Toluca, mediante la aplicación del método *SINTACS*, en combinación con el análisis de las características físicas de los agrietamientos que se han identificado en la zona de estudio. A pesar de que el método *SINTACS*, no considera los agrietamientos en medios detríticos para determinar el grado de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, fue posible incluirlos como factor mediante su ubicación espacial y el incremento de los valores de los parámetros N (autodepuración de la zona no saturada) y T (tipo de suelo). Con esto se modificó el mapa de vulnerabilidad *SINTACS* y se obtuvo un nuevo mapa, donde se presenta un incremento el índice de vulnerabilidad en el área de influencia de las grietas, cuyo índice cambió de “Bajo” a “Alto”.

Un factor necesario de valorar es la concentración de pozos de extracción de agua en la zona de agrietamientos y sus alrededores, los cuales, en el caso de ser pozos de escasa profundidad, pueden presentar algún grado de contaminación, y en el caso de ser pozos de extracción profunda, pueden agudizar la problemática del agrietamiento, aumentando el área de afectación en el futuro.

Adicionalmente, es importante diseñar estrategias de monitoreo y control de la contaminación y particularmente establecer un seguimiento de las zonas de agrietamiento a fin de evitar peligros innecesarios a la población aledaña a dichas zonas.

Otro impacto es el incremento de costos por bombeo a mayor profundidad, el cual se valoró a través de costos energéticos. Se pudo concluir que el consumo energético por extracción de agua refleja de manera objetiva el impacto del abatimiento del nivel de aguas subterráneas respecto a su aprovechamiento debido a que evita las fluctuaciones provocadas por tasas de interés y la devaluación de moneda, no requiere de ajustes interanuales al utilizar unidades de medición energéticas y no puede ser manipulado de manera arbitraria. Además, constituye una herramienta para la planeación territorial al determinar zonas con mayor tendencia a incrementar consumos energéticos.

Sin duda alguna, estos resultados se convierten en instrumentos muy significativos de gestión del crecimiento urbano. En efecto, las variables de costo de extracción de agua subterránea deben ser consideradas en etapas de planeación y otorgamiento de permisos para desarrollos habitacionales.

Igualmente, los incrementos de costos deben orientar la definición del sistema tarifario de agua potable y la determinación del tipo de industria con potencial para asentarse, privilegiando aquellas de bajo consumo hídrico pero alto valor agregado y generación de empleos con mano de obra calificada.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de México (Proyecto UAEM 2600/2008), así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Proyecto CONACyT 52136) su apoyo al financiar los trabajos de investigación que permitieron obtener los resultados aquí presentados.

Referencias

- Bense, V.F., E.H. Van Den Berg, R.T. Van Balen (2003). "Deformation mechanisms and hydraulic properties of fault zones in unconsolidated sediments, The Netherlands" en *Hydrogeology Journal*, 11(3): 319-332.
- Birkle, P., V., Torres-Rodríguez, E. González-Partida (1998). "The water balance for the Basin of the Valley of Mexico and implications for future water consumption" en *Hydrogeology Journal*, 6, 500-517.

EXPLOTACIÓN INTENSIVA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE TOLUCA:

- Calderhead A.I., R. Therien, A. Rivera, R. Martel, J. Garfias (2011). "Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico" en *Advances in Water Resources*, 34, 83-97
- Carreón, D., C. Hidalgo, M. Hernández (2006). "Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México" en *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número especial de Geología Urbana, LVIII (2): 237-250.
- Carrillo-Rivera, J.J., A. Cardona, R. Huizar-Álvarez, E. Graniel-Castro (2008). "Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico" en *Environmental Geology*, 55(2): 303-319
- CCRECRL (1993). *Atlas ecológico de la cuenca hidrográfica del Río Lerma*. México: Gobierno del Estado de México.
- Civita, M., M. De Maio (2004). "Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach" en *Geofísica Internacional*, 43(4): 513-532.
- Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2006). Registro de lecturas piezométricas. Acuífero del Valle de Toluca, Reporte interno. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2009). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Toluca, Estado de México. México: Comisión Nacional del Agua. http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Aguasubterranea/pdf/DR_1501.pdf. Consultado el 10 Diciembre 2009
- Comisión Nacional del Agua CONAGUA (2010). Estadísticas del Agua en México. Edición 2010 México: Comisión Nacional del Agua. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2010-16Junio2010.pdf>. Consultado el 15 Febrero 2011.
- Esteller, M. V., J.M. Andreu (2005). "Antropic effects on hydrochemical characteristics of the Valle de Toluca aquifer (central Mexico)" en *Hydrogeology Journal*, 13: 378-390.
- Esteller, M.V., C. Díaz-Delgado (2002). "Environmental effects of aquifer overexploitation: a case study in the Highlands of Mexico" en *Environmental Management*, 29(2):266-278
- Esteller, M.V., R. Rodríguez, A. Cardona, L. Padilla-Sánchez (2011). "Evaluation of hydrochemical changes due to intensive aquifer exploitation: study cases from Mexico" en *Environmental Monitoring and Assessment*. DOI 10.1007/s10661-011-2376-0

- Fonseca, C.R., M.V. Esteller, C. Díaz-Delgado (2010). "Energy cost of water extraction in an aquifer under intensive exploitation in the Mexican Highlands" en 10th International Symposium on Stochastic Hydraulics. Québec, Canada.
- Foster, S., R. Hirata, D. Gomes, M. D'Elia, M. Paris (2002). "Protección de la calidad del agua subterránea". Banco Mundial. Washington.
- González, M., P. Munguía (2009). "Análisis y evaluación de la evolución hidrodinámica del acuífero del Valle de Toluca". Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Herrera, M.E., J.L. Sánchez (1994). "Estratificación y Recursos Minerales del Estado de México". Memoria y mapas. México: Gobierno del Estado de México. Secretaría de Desarrollo Económico.
- Hsiao, C.T., L.C. Chang (2002). "Dynamic optimal groundwater management with inclusion of fixed costs" en *Water Resources Planning and Management*, 128(1):57-65.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.censo2010.org.mx/> Consultado el 5 de enero de 2012.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA, (2006). Censo de aprovechamientos en el acuífero Valle de Toluca. México D.F: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Jiménez-Moleón, M.C., R.M. Fuentes, M.T. Mota (2010). "Groundwater hydrochemistry of an overexploited aquifer: the case of the Toluca Valley, Mexico". en: Marinov, A.M, Brebbia C.A. (Edit) *Water Pollution X*. WIT Press Southampton pp:27-38.
- MacDonald, A.M., B.É. Ó Dochartaigh, R.C. Calow, Y. Shalabi, K. Selah, S. Merrett (2009). "Mapping groundwater development costs for the transboundary Western Aquifer Basin, Palestine/Israel" en *Hydrogeology Journal*, 17:1579-1587
- Marsico, A., G. Giuliano, L. Penneta, M. Vurro (2004). "Intrinsic vulnerability assessment of the south-eastern Murge (Apulia, southern Italy)" en *Natural Hazards and Earth System Science*, 4: 769-774.
- Mejía J. A., R. Rodríguez, A. Armienta, E. Mata, A. Fiorucci (2007). "Aquifer vulnerability zoning, an indicator of atmospheric pollutants input? Vanadium in the Salamanca aquifer, México" en *Water Air and Soil Pollution*, 85(1-4):95-100
- Mejía, J.A. (2007). Factores que afectan la vulnerabilidad del sistema acuífero de Salamanca, Gto. Tesis Doctoral, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Muñoz, R. (2008). "Evaluación del peligro de contaminación de las aguas subterráneas del acuífero del Valle de Toluca, desde un enfoque hidrodinámico". Tesis de licenciatura, Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.