

ANÁLISIS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO TEXCOCO, MÉXICO

• Bernardo Samuel Escobar-Villagrán • Óscar Luis Palacios-Vélez •
Colegio de Postgraduados

Resumen

El acuífero Texcoco es el principal recurso de agua de 12 municipios en la parte oriente del Valle de México, con una población cercana a un millón y medio de habitantes. El desarrollo económico de esta región depende fuertemente de la posibilidad de alcanzar un manejo sustentable del acuífero, el cual está sobreexplotado actualmente, a pesar de que el grado de sobreexplotación es desconocido. Ya que el conocimiento de un valor creíble de la sobreexplotación es completamente indispensable para poder elaborar e implementar un plan de manejo sustentable del acuífero, el objetivo de este trabajo fue analizar las fuentes de incertidumbre y errores en la estimación de la sobreexplotación. Para este propósito se aplicaron dos métodos: a) el método del balance hidrológico, que consiste en medir o calcular las diferentes entradas y salidas de agua del área acuífera, y b) el método basado en el monitoreo de la carga hidráulica y el conocimiento del almacenamiento específico (en acuíferos confinados) o rendimiento específico (en acuíferos no confinados), determinado por pruebas de bombeo. Como resultado de la aplicación de estos métodos se obtuvo una sobreexplotación de $62 \text{ hm}^3/\text{año}$ por el método del balance hidrológico, mientras que el uso del segundo método dio un valor de $67.6 \text{ hm}^3/\text{año}$. Ambos valores resultaron muy similares por una mera coincidencia, ya que hay error en el cálculo de la evapotranspiración real que debería ser sustraída del volumen de precipitación para poder calcular la recarga vertical; el escurrimiento superficial que entra y sale de la parte acuífera no es medido en los sitios requeridos; las características hidrogeológicas del acuífero no son medidas *in situ*, sino que son tomadas de los acuíferos cercanos; no hay suficientes medidas representativas que pudieran permitir la correcta estimación del gradiente, y de los flujos de entrada y salida de agua subterránea. Aun el volumen de agua extraída por bombeo de pozos es determinado insuficientemente debido a que hay un número desconocido de pozos clandestinos y la información correspondiente al registro de pozos está incompleta y desactualizada.

Palabras clave: plan de manejo sustentable de un acuífero, cálculo de la sobreexplotación, características del acuífero, errores en el balance hidrológico.

Introducción

México, al igual que muchos otros países del mundo, enfrenta problemas relativos a la disponibilidad de agua y contaminación de corrientes y acuíferos, que se agravan por los patrones de consumo actuales en los diversos usos, los cuales generan grandes pérdidas. De seguir así, se incrementarán las zonas de escasez y las fuentes

de abastecimiento tendrán serias restricciones para poder atender a las nuevas generaciones de usuarios (Semarnap-Conagua, 2000).

Un parámetro de referencia en el contexto internacional en relación con el agua es la disponibilidad per cápita. De acuerdo con datos publicados (Semarnat-Conagua, 2008), nuestro país ocupa el lugar 89 entre las naciones del mundo por su disponibilidad per cápita, que en

2007 llegaba tan sólo a 4 312 m³/año, mientras que países como Canadá, Perú, Chile, Colombia y Brasil, cuentan con una disponibilidad por habitante y por año superior a los 40 000 metros cúbicos. Un país desarrollado, como Francia, cuenta con menos recursos per cápita (3 320 m³/año) que México. Sin embargo, se ubica en latitudes más septentrionales, donde la evapotranspiración es menor, por lo que tiene menor grado de escasez que nosotros.

Hay que aclarar que la disponibilidad de agua por habitante disminuye conforme aumenta la población del país. Es así que nuestro país en 1950 disponía de poco más de 18 000 m³/habitante/año, valor que, como se dijo, en la actualidad apenas rebasa los 4 300 m³/habitante/año.

En lo que se refiere a los usos del agua, el volumen concesionado a diciembre de 2006, sin incluir la generación de energía hidroeléctrica, era de 77 321 millones de metros cúbicos. De este volumen, el 77% corresponde al uso agrícola, 14% al público y 9% a las industrias que obtienen agua de ríos y acuíferos; es oportuno comentar que en el uso agrícola se están incluyendo los usos agrícola, pecuario, acuícola y múltiples, que se establecen en la clasificación de la Ley de Aguas Nacionales.

Actualmente, en el país se extraen del subsuelo cerca de 28 900 hm³/año, de los cuales el 69.55% se destina al uso agrícola y un 23.88% al público-urbano. En los últimos cuarenta años, la reserva estratégica de agua subterránea ha perdido por sobreexplotación del orden de 60 000 hm³ y se sigue mermando a un ritmo de 5 400 hm³/año.

La superficie dedicada a la agricultura en México es de aproximadamente 21 millones de hectáreas (10.5% del territorio nacional); de ella, 6.5 millones son de riego y 14.5 de temporal. Aproximadamente el 57% del agua subterránea extraída se destina al riego agrícola de una tercera parte de los 6.5 millones de hectáreas bajo riego en el país.

En México se han delimitado 653 acuíferos (conforme a lo publicado en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF), el 5 de diciembre

de 2001) distribuidos en 13 regiones hidroológico-administrativas. El problema de la sobreexplotación de los acuíferos del país es cada vez más grave; en 1975 eran 32 los acuíferos sobreexplotados, número que se elevó a 36 en 1981, a 80 en 1985, a 97 en 2001, y a 102 en 2003. El bombeo intensivo de agua subterránea ha dado lugar a su sobreexplotación en forma exponencial; en el año 2006, 104 acuíferos se sobreexplotaban y de ellos se extraía el 60% del agua subterránea que se empleaba en el país (PNH, 2007).

La Región Administrativa XIII Valle de México, que alberga cerca de 22 millones de habitantes, la más poblada del país, se ubica en la cuenca alta del río Pánuco y para fines de planeación está formada por cuatro subregiones hidroológicas: Valle de México, Río Tula, Norte de Veracruz y Alto Balsas (Semarnat-Conagua, 2008). En la región se identifican 14 acuíferos: cinco en Valle de México, siete en el río Tula, uno en el norte de Veracruz y uno en el Alto Balsas. En esta región existe una problemática en relación con el manejo de los recursos hidráulicos, ya que sus fuentes superficiales se encuentran prácticamente agotadas en su totalidad, lo que representa un claro ejemplo de la vulnerabilidad del equilibrio ecológico ante el desordenado crecimiento y la incesante demanda. La condición de sobreexplotación de los acuíferos (cuatro acuíferos sobreexplotados de los 14 acuíferos se ubican específicamente en la Subregión Valle de México, y uno de ellos, el acuífero Texcoco) se presenta en forma global, con una extracción total que excede en un 130% la magnitud de la recarga (Semarnat-Conagua, 2000), cifra que en diferentes estudios ha variado entre 800 y 900% (PDMT, 2006), lo que subraya la importancia del problema en cuanto a su cuantificación.

El problema referente a la gran incertidumbre en las estimaciones de la sobreexplotación (recarga menos extracción) de los acuíferos mencionados se puede observar con más detalle para el caso particular del acuífero Texcoco (cuadro 1, y figuras 1 y 2), según datos publicados en el DOF en los años 2003 y 2009.

En este sentido, este acuífero, de acuerdo con información recabada por la Comisión Nacional del Agua (Conagua), es el más sobreexplotado de los 14 acuíferos del Valle de México, en donde la extracción de agua subterránea superaba a la recarga en más de nueve veces (2003); sin embargo, en un estudio posterior llevado a cabo en 2007 (publicado en el DOF en 2009), aunque no cubría exactamente la misma área, pues en ese lapso se modificaron las fronteras del acuífero, la extracción superó a la recarga en menos de 15%. Esta diferencia sólo muestra la gran incertidumbre que se tiene al tratar de cuantificar algunos componentes del

balance hídrico, como la recarga de infiltración, o incluso las mismas extracciones, por la cantidad desconocida de pozos de bombeo clandestinos.

En la figura 1 se muestran los mismos datos, pero comparándolos con los de recargas y extracciones en los otros cuatro acuíferos importantes del Valle de México, donde pueden apreciarse de manera gráfica las grandes diferencias reportadas, principalmente para el acuífero Texcoco. La enorme disminución en el volumen de extracción no se debe a que haya mejorado sustancialmente la eficiencia en el manejo del

Cuadro 1. Comparación de la sobreexplotación del acuífero Texcoco, calculada por el método del balance hidrológico, en diferentes años.

Fuente y año de información	DOF* (2003)	DOF* (2009)	Presente estudio
Municipio	Volumen de extracción (m³/año)	Volumen de extracción (m³/año)	Volumen de extracción (m³/año)
Delegación Iztapalapa	81 129 429.00		
Tezoyuca		485 520.00	485 520.00
Atenco	8 609 184.00	6 199 964.00	6 199 964.00
Chiautla	3 839 311.00	4 973 076.00	4 973 076.00
Chicoloapan	5 252 493.00	19 078 944.00	19 078 944.00
Chiconcuac	2 381 225.00	3 471 933.00	3 471 933.00
Chimalhuacán	19 100 763.00	34 596 527.00	34 596 527.00
Ecatepec	230 497 858.00		
1/2 Ixtapaluca		1 090 594.00	1 090 594.00
La Paz	34 812 598.00	28 449 756.00	28 449 756.00
Nezahualcóyotl	26 638 775.00	2 207 520.00	2 207 520.00
Papalotla	912 396.00	1 123 571.00	1 123 571.00
Tepetlaoxtoc	2 704 667.00	4 723 170.00	4 723 170.00
Texcoco	49 479 002.00	76 626 867.00	76 626 867.00
Área del acuífero (km²)	921.31	938.00	939.04
Área de balance (km²)	ND**	483.00	939.04
Recarga (hm³/año)	48.60	161.00	124.80
Extracción (hm³/año)	465.4	184.2***	186.8****
Sobreexplotación (hm³/año)	-416.80	-23.20	62.00
Relación extracción/recarga	9.58	1.14	1.50

* Diario Oficial de la Federación.

** ND, no se encontraron datos en los estudios disponibles.

*** Cabe mencionar que de acuerdo con la información disponible en cuanto al censo de aprovechamiento de agua subterránea realizado en 2006, del cual se tomó la información para 2009, la suma de las extracciones de pozos, norias y manantiales debería haber sido de 183.03 hm³/año.

**** El valor de 186.8 hm³/año corresponde a la suma de las extracciones de pozos, norial y manantiales (183.03 hm³/año) más las salidas horizontales (3.80 hm³/año).

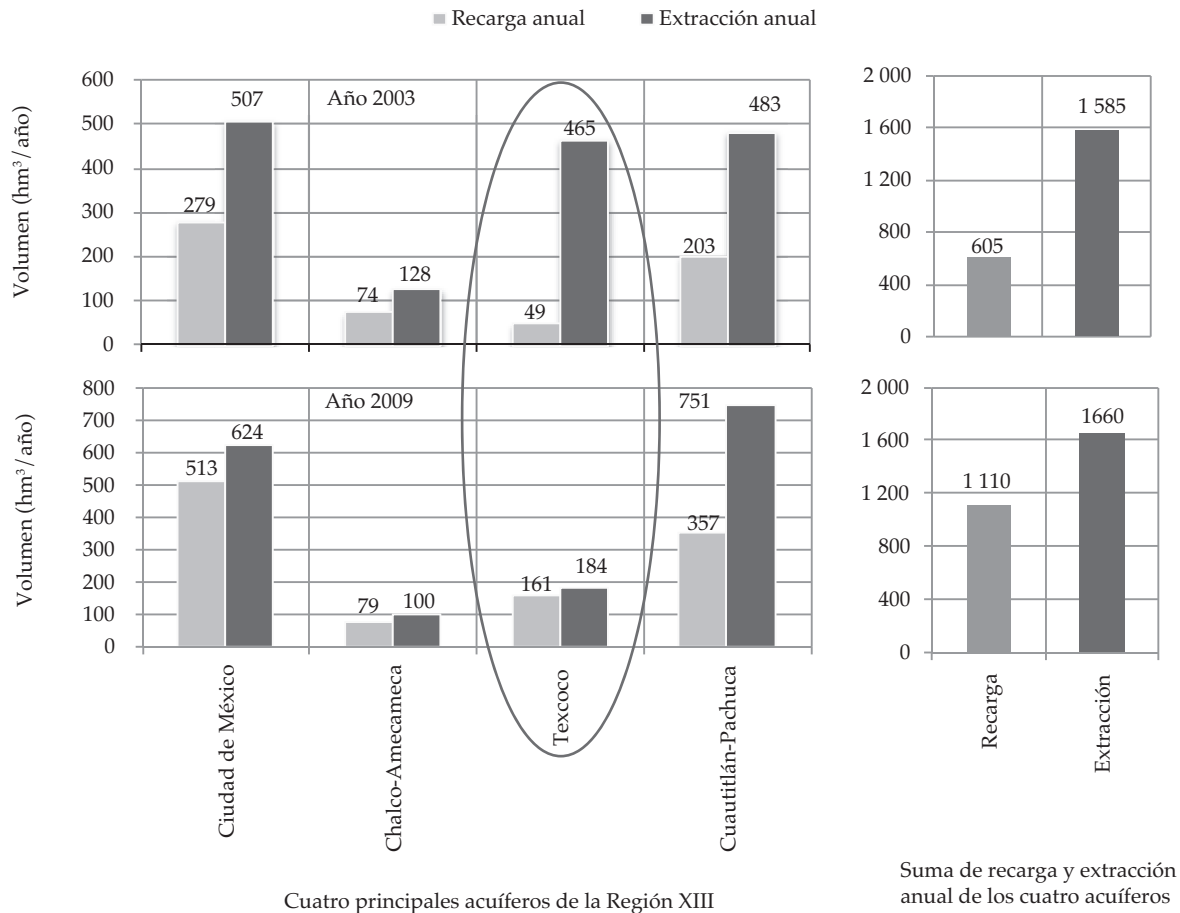


Figura 1. Comparación de extracción y recarga de algunos acuíferos de la Región XIII Valle de México, publicados en el DOF 2003 y 2009.

agua, sino tan sólo a que en el año 2003 el área del acuífero incluía el municipio de Ecatepec y la Delegación de Iztapalapa (con más de dos millones de habitantes), y los límites actuales del acuífero ya no los incluye. Por otro lado, el aumento en la recarga no se debe a que se hubieran implementado importantes programas de recarga de acuíferos, sino solamente a un “cambio en el procedimiento de cálculo” (Conagua, 2007).

El conocimiento del grado de sobreexplotación es fundamental para elaborar un plan de manejo. El objetivo central del plan de manejo de un acuífero es que su utilización

sea *sustentable*; es decir, que pueda usarse tanto hoy, por la generación presente, como mañana, por las generaciones futuras. Un manejo sustentable requiere que se cumplan dos condiciones:

- Que las extracciones anuales medias no rebasen la recarga anual media.
- Que no se deteriore la calidad del agua del acuífero por contaminantes diversos, como sales solubles o sustancias tóxicas.

Es importante considerar que, dadas las muy bajas velocidades del agua cuando se

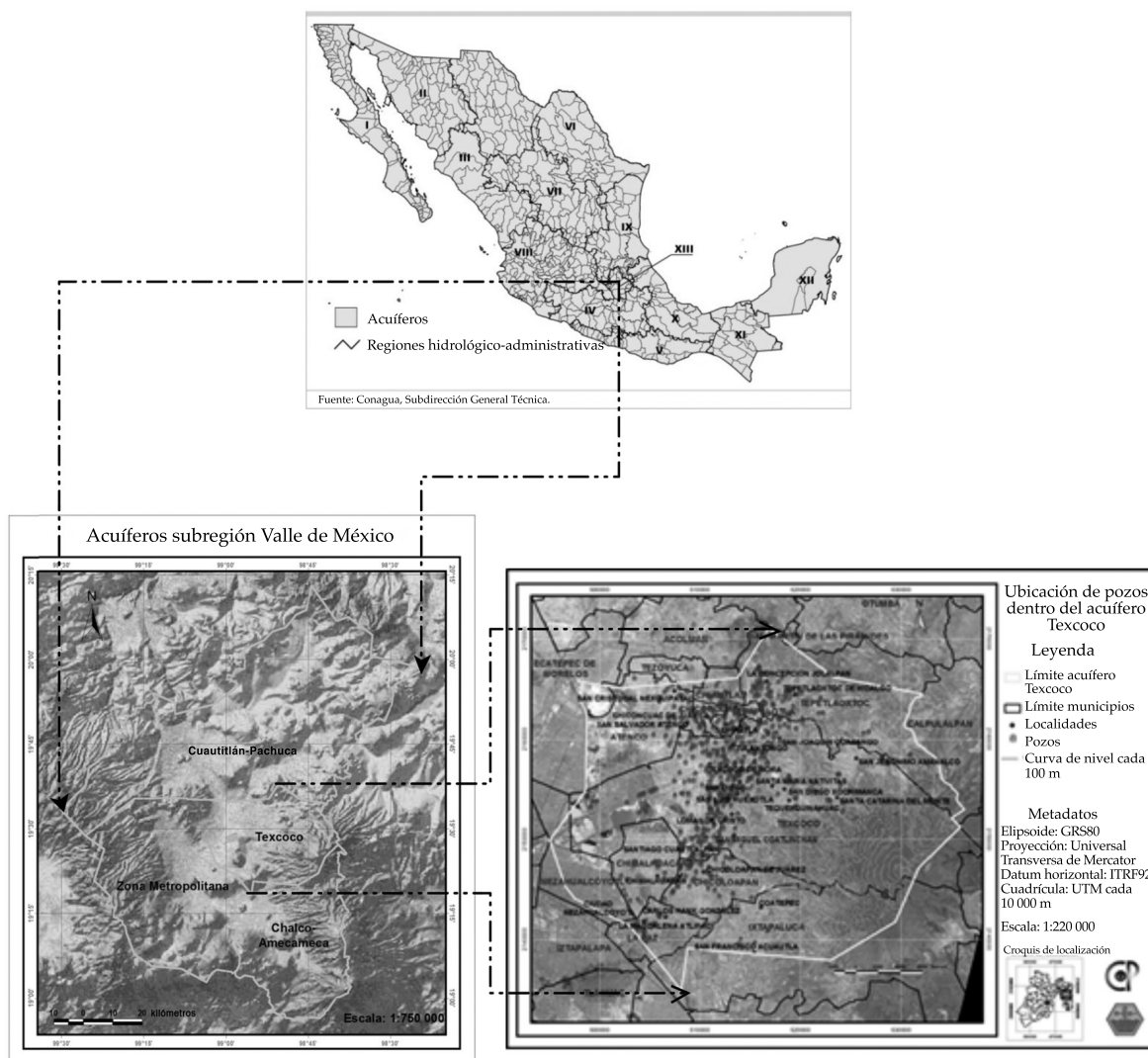


Figura 2. Localización del acuífero Texcoco, sus aprovechamientos subterráneos, que es el área de balance 2009, y pozos piloto.

mueve a través del suelo (del orden de tan sólo algunos metros por año), la recarga que se infiltra hoy a un acuífero no será necesariamente el agua que se extraiga mañana del mismo acuífero sino quizá muchos años después. Es decir, existe un retraso en el proceso de sustituir el agua extraída por el agua infiltrada.

Dada la ambigüedad en la valoración de los componentes del balance hídrico para determinar la sobreexplotación en el acuífero Texcoco, el objetivo del presente trabajo fue

analizar las estimaciones existentes sobre el grado de sobreexplotación del acuífero, con miras a obtener un diagnóstico más confiable de dicha sobreexplotación, la cual es totalmente indispensable para elaborar un plan de manejo sustentable del acuífero.

La cuantificación del grado de sobreexplotación se determinó mediante dos métodos; por un lado, analizando las componentes que integran la ecuación del balance hídrico, que corresponde a la aplicación del principio de la conservación de la masa o ecuación

de continuidad (Sokolov y Chapman, 1981); por otro lado, se determinó como la suma o integración del producto del abatimiento por el coeficiente de almacenamiento y por el área de la parte del acuífero, proporcionando el volumen de la sobreexplotación, también denominado “minado” del acuífero (Peña, 2007).

Descripción del marco físico

Definición del área que comprende el acuífero Texcoco

El área de estudio se localiza en la porción central del país y en la porción oriente del Estado de México. Está delimitada entre las coordenadas 98°39' y 99°02' de longitud oeste y 19°18' y 19°35' de latitud norte, y contiene un área de 939.04 km² (93 904 ha). Su localización se muestra en la figura 2 y para su elaboración se procesó una imagen SPOT de la zona de estudio del año 2007. Dentro del polígono del acuífero se ubican 12 municipios del Estado de México. El acuífero Texcoco está comunicado hacia el norte con el acuífero Cuautitlán-Pachuca; también manifiesta comunicación hacia el oriente, con el acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México; finalmente tiene comunicación hacia el sur con el acuífero Chalco-Amecameca (figura 2), a través de materiales permeables de la Formación Tarango y de los depósitos aluviales.

Geología

La geología del acuífero Texcoco se basa en el nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, publicado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Mooser *et al.*, 1996), que representa los avances más recientes del conocimiento geológico del Valle de México, área donde se localiza el acuífero Texcoco.

De esta manera, el área de estudio se concentra en la porción oriental del valle

donde existen materiales (Qal) aflorando y subyaciendo a los depósitos lacustres, donde debe funcionar como semiconfinado, a más de la porción central (T), de permeabilidad variable según su estratificación, por lo que también debe funcionar como semiconfinado, en tanto que la parte extrema oriental está formada por rocas ígneas de media permeabilidad que pueden considerarse como zonas de recarga del acuífero de la planicie, al propiciar escurrimientos superficiales, que en parte se infiltran al subsuelo a través de las rocas de la Formación Tarango, y recargar posteriormente a los acuíferos de la planicie (figura 3).

Tipo de acuífero

Debido a que el acuífero Texcoco presenta de manera irregular material arcilloso que le sirve como confinante o semiconfinante, el acuífero se clasifica como semiconfinado.

El material impermeable del acuífero Texcoco lo constituyen rocas volcánicas antiguas y calizas, en tanto que el paquete sedimentario da origen a un sistema acuífero complejo formado por tres grandes cuerpos. En la parte superior, un paquete arcilloso de alta porosidad, baja permeabilidad y gran heterogeneidad en su constitución, que forma un acuitardo de espesor variable y que actúa como confinante o semiconfinante en el centro de la cuenca. Bajo este paquete se encuentra el acuífero actualmente en explotación, formado por material granular más grueso que el del acuitardo, esto es, piroclastos y conglomerados de origen volcánico. Su espesor es variable (generalmente mayor de 200 m), así como sus propiedades hidráulicas. Le subyacen rocas volcánicas fracturadas, cuya base llega a estar a los 2000 m en el centro, disminuyendo hacia los márgenes de la cuenca.

Elevación del nivel estático

La configuración de las curvas de igual elevación de los niveles estáticos en los pozos representa las equipotenciales de la red flujo subterráneo y, en consecuencia, indica las

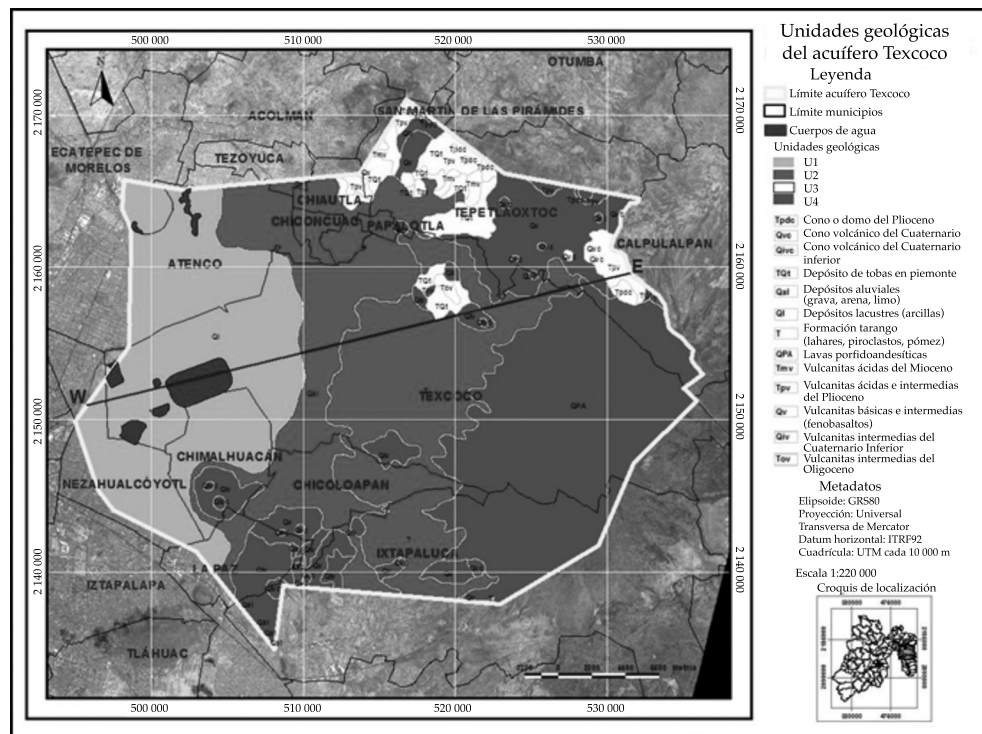


Figura 3. Geología en el área del acuífero Texcoco, México.

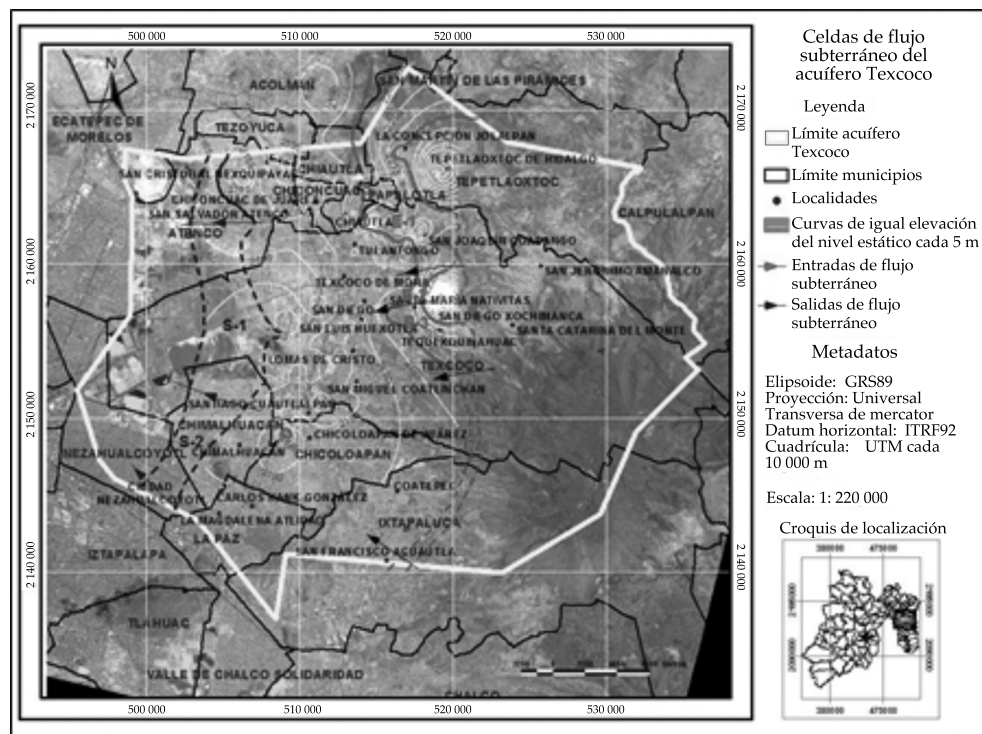


Figura 4. Curvas de igual elevación del nivel estático 2010, y canales de flujo de entrada y salida de agua subterránea en el acuífero Texcoco (msnm), México.

direcciones que adopta en su recorrido en el subsuelo mediante curvas perpendiculares (figura 4). El agua subterránea del acuífero Texcoco, según las configuraciones de los niveles estáticos del año 2010, presentan un flujo horizontal con dirección general de oriente a poniente, con algunos conos de abatimiento causados por la sobreexplotación.

Metodología

Determinación de las características climáticas en el acuífero Texcoco

Las características climáticas determinadas fueron la precipitación promedio en toda el área del acuífero, temperatura media y evapotranspiración real. Esta información se generó con base en 28 estaciones climatológicas distribuidas dentro y fuera del área de estudio. Los valores de estas variables se obtuvieron del Extractor Rápido de Información Climática versión III (*ERIC III*) elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con un periodo de registro de 47 años (1960-2007). Al igual que en otros estudios sobre este acuífero (Conagua, 2006), la evapotranspiración real se calculó por el método de Turc mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

ETR = evapotranspiración real (mm/año).

P = precipitación (mm/año),

$L = 300 + 25T + 0.05 T^3$,

T = temperatura (°C).

Con los datos obtenidos para las 28 estaciones climatológicas, se realizó una interpolación para cada píxel del área del acuífero, utilizando el método del recíproco de las distancias al cuadrado (Cristóbal, 1996). A

partir de los datos interpolados se generaron los planos de isoyetas, isotermas e isolíneas de evapotranspiración real.

Método del balance hidrológico

La forma general de la ecuación de balance representada en su forma más simple es la siguiente:

$$\begin{aligned} &\text{Entradas (E) – salidas (S)} \\ &= \text{cambio de almacenamiento } (\Delta V) \end{aligned} \quad (2)$$

Las entradas de agua total (E) al acuífero se pueden agrupar por las entradas verticales (E_v) más las entradas horizontales (E_H), también llamadas entradas por flujo horizontal de agua subterránea.

$$E = E_v + E_H \quad (3)$$

Como entradas verticales (E_v) se consideran:

- La parte de la precipitación atmosférica que se infiltra hacia el acuífero (V_I). Su magnitud se puede calcular como la diferencia de la lluvia que se precipita sobre la superficie del acuífero (V_p), menos el volumen evapotranspirado por los cultivos agrícolas y la vegetación natural (V_{ETR}) y menos el escurrimiento superficial que sale de los límites del área del acuífero (V_E):

$$V_I = V_p - V_{ETR} - V_E \quad (4)$$

Donde:

V_I = volumen infiltrado (m^3).

V_p = volumen precipitado (m^3).

V_{ETR} = volumen evapotranspirado por los cultivos agrícolas y plantas naturales (m^3).

V_E = volumen de escurrimiento superficial a la salida del acuífero (m^3).

- Volumen precipitado (V_p): es quizá el único componente que se puede medir con una

- precisión aceptable si se tiene un número suficiente de estaciones pluviométricas.
- Volumen evapotranspirado por los cultivos agrícolas y plantas naturales (V_{ETR}): este componente es el más difícil de determinar, ya que para ello se requiere el valor de la evapotranspiración, que depende de una gran cantidad de variables (radiación solar, poder evaporante de la atmósfera, temperatura, velocidad del viento, luminosidad, contenido de humedad del suelo, tipo de vegetación y su estado de desarrollo, etcétera). Algunos métodos para determinar la magnitud de la ETR, como los métodos teóricos y las medidas directas, están ligados al carácter microclimático del proceso y, en consecuencia, son los únicos realmente válidos, siempre que reflejen fielmente las condiciones naturales. Desafortunadamente son de delicada y costosa aplicación. Otros métodos, como los empíricos, tienen la ventaja de su mayor economía, pues en general se basan en datos meteorológicos corrientemente obtenidos de las estaciones climatológicas; no obstante, los valores que se obtienen con ellos tendrán escasa validez si no están contrastados con medidas directas en la zona donde se aplican. Sin este requisito será muy aventurado darles un significado ni siquiera orientativo (Custodio y Llamas, 1983).
 - Volumen de escurrimiento superficial a la salida del acuífero (V_E): el escurrimiento en principio se podría medir si se tuvieran las estaciones de aforo y se realizaran mediciones de los caudales escurridos con la frecuencia requerida, según la variación temporal de los mismos; además, debe considerarse la existencia de cuerpos de agua como lagos o vasos de almacenamiento, y es necesario realizar un balance, que puede calcularse mediante la ecuación de continuidad. Este enfoque sería lo más deseable.

El escurrimiento superficial también se puede calcular mediante una gran cantidad de

modelos disponibles, como el llamado método del “Número de Curva” elaborado por el Soil Conservation Service (USDA). Sin embargo, estos modelos requieren la definición de un parámetro que caracteriza la infiltración del agua en el suelo y que depende de factores tales como la intensidad y duración de la precipitación, la permeabilidad de la superficie del suelo, tipo y extensión de la vegetación, área de la cuenca de captación, geometría de los cauces, profundidad de la superficie freática, pendiente del terreno, condición de humedad antecedente, etcétera. Este parámetro es muy variable y su definición es muy incierta.

Un método también utilizado cuando la información hidrométrica es escasa, es determinar un coeficiente de escurrimiento (C_e) (Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000). La subjetividad de este método se encuentra a la hora de clasificar el uso del suelo y la vegetación, ya que la norma restringe a una clasificación ya determinada que proporciona valores de K para suelos definidos como permeables, medianamente permeables y suelos casi impermeables, que los definen de acuerdo con texturas, sin determinar los rangos.

Las expresiones citadas en la norma y utilizadas para la elaboración del plano de coeficiente de escurrimiento de acuerdo con el valor del factor K son las siguientes:

$$C_e = \frac{k(P-250)}{2000} + \frac{(k-0.15)}{1.5}; k > 0.15$$

$$C_e = \frac{k(P-250)}{2000}; k \leq 0.15$$
(5)

Donde:

K = parámetro f (tipo de suelo: permeabilidad; uso del suelo: cobertura) (adimensional)

P = precipitación (mm).

El rango de validez de las fórmulas (5) es para valores de precipitación anual entre 350 y 2 150 mm.

- b) Pérdidas por infiltración en las redes de canales o tuberías de agua potable (R_{ipu}), así como recarga inducida en campos agrícolas y estanques (R_{ia}). Las pérdidas en las redes de canales y tuberías, cuando existen, se podrían deducir si se tuvieran aforos suficientes en puntos estratégicos. Como en general se carece de ellos, es frecuente asumir que un cierto porcentaje de los caudales (por ejemplo un 30 o 40%) se pierde y regresa al acuífero.

Las entradas verticales mencionadas anteriormente se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} E_V &= V_I + R_{ia} + R_{ipu} \\ &= (V_P - V_{ETR} - V_E) + R_{ia} + R_{ipu} \end{aligned} \quad (6)$$

Como entradas horizontales (E_H)

Las entradas de flujo subterráneo horizontal que ingresan al acuífero por su periferia o desde acuíferos más profundos (E_H).

La magnitud de este componente se puede calcular mediante la ecuación de Darcy, conociendo la transmisividad tanto en la periferia como en la base del acuífero, así como los gradientes de energía respectivos. Para esto deben realizarse pruebas de bombeo y medición de los niveles piezométricos. Estas pruebas y mediciones tienen un elevado costo, por lo que cuando se realizan, su número suele ser insuficiente. Como resultado de esta insuficiencia, a veces se asume que el valor de la transmisividad en un sitio del acuífero es el mismo que en otro sitio ubicado a muchos kilómetros de distancia. La cuantificación de la recarga subterránea horizontal o flujo subterráneo proveniente de zonas aledañas al área en cuestión, se puede obtener a partir de la siguiente expresión:

$$E_H = \sum_{j=1}^{nc} Q_j t = \sum_{j=1}^{nc} T_j i_j B_j t \quad (7)$$

En donde Q es el caudal; T , la transmisividad; i , el gradiente hidráulico; B , el ancho del canal de flujo (también llamado “tubo de corriente”); t , el tiempo, y nc es el número de canales de flujo de entrada y/o salida, definidos en la periferia del área de balance.

Para obtener los flujos de entrada y salida, las zonas de recarga y descarga se dividen en tantos canales de flujo como se quiera, de acuerdo con la uniformidad de las líneas equipotenciales o de corriente, y de la transmisividad. El caudal total de entrada por flujo horizontal (E_H) es la suma de los correspondientes a cada canal de flujo.

Las extracciones o salidas de agua (S) del acuífero están constituidas por:

1. El volumen de extracciones (V_{EAS}) que se realizan en un acuífero en un tiempo dado es, simplemente, la suma de los volúmenes bombeados en todos los pozos existentes. Esto parecería el componente más sencillo de medir. Sin embargo, se presentan varios problemas que dificultan esta tarea:
 - a) En primer lugar se sospecha, y aún se sabe, que hay un número indeterminado de pozos clandestinos e ilegales, cuyo volumen de extracción se desconoce. Éste es probablemente el mayor obstáculo, pero no el único.
 - b) Las bases de datos de los pozos registrados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) suelen ser incompletas, desactualizadas y además suelen contener errores, por ejemplo, en la ubicación geográfica de los pozos.
2. Salidas horizontales por flujo subterráneo (S_H). El valor de este componente, así como la determinación de los canales de salida, se puede calcular al igual que las entradas por flujo subterráneo mencionadas anteriormente, mediante la ecuación de Darcy.

3. La descarga natural comprometida (V_{DNC}) corresponde con la suma de los volúmenes de agua concesionada de los manantiales y del caudal base de los ríos (para su cálculo generalmente se aplica el análisis de los hidrogramas en su componente de la curva de recesión y decaimiento) comprendidos en la unidad hidrogeológica evaluada, que están comprometidos como agua superficial para diversos usos, más las descargas subterráneas que se deben conservar para no afectar a las unidades hidrogeológicas (flujo horizontal que sirve de recarga para acuíferos aguas abajo o destinados para sostener el gasto ecológico).

Por lo tanto, las salidas totales de agua (S) del acuífero se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$S = V_{EAS} + S_H + V_{DNC} \quad (8)$$

Evaluación de la sobreexplotación como cambio de almacenamiento (ΔV) determinado por el producto del coeficiente de almacenamiento (S) y la variación de la carga hidráulica (Δh)

La sobreexplotación de un acuífero se puede también *medir* directamente, sin necesidad de calcular la recarga y las extracciones, a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^{na} a_i h_i S_i \quad (9)$$

Donde:

ΔV = cambio de almacenamiento (m^3 /año).

h_i = evolución media o variación de la carga hidráulica (Δh) (m /año).

S_i = coeficiente de almacenamiento (adimensional).

a_i = elemento de área (m^2).

na = número de elementos en que se divide el área de balance.

Para esto se requieren básicamente dos tipos de datos:

- La evolución de los niveles piezométricos (o freáticos) del acuífero, también denominada variación de la carga hidráulica (Δh). Para esto es importante tener un programa de mediciones de estos niveles en tantos sitios como sea posible. Puede haber pozos de observación construidos específicamente para este propósito (generalmente muy pocos, por su alto costo), pero también se pueden hacer lecturas en los pozos de bombeo. En este último caso es importante distinguir entre niveles dinámicos, cuando el pozo está operando; o niveles estáticos, cuando el pozo no está en operación. La comparación debe hacerse entre niveles dinámicos o estáticos. La sobreexplotación del acuífero se manifiesta frecuentemente cuando se tienen abatimientos continuos de estos niveles a través de los años.
- El coeficiente de almacenamiento (S_i) y sus variaciones a lo largo y ancho de los acuíferos. De acuerdo con Ralph C. Heath (1989) es el "Volumen de agua liberado del almacenamiento de un prisma unitario de acuífero cuando la carga hidráulica decrece una unidad. El coeficiente se determina con pruebas de bombeo en las que se cuente con un pozo de observación del nivel del agua, las que por lo general se realizan en número insuficiente por el alto costo de las mismas".

Resultados

Determinación de las características climáticas en el acuífero Texcoco

La precipitación media anual obtenida para la zona fue del orden de 650.73 mm, la cual genera un volumen llovido de 611.061 hm³/año. La temperatura media anual es del orden de 15.48 °C, con la cual se obtuvo un valor de la evapotranspiración real, calculada por

el método de Turc, de 528.81 mm/año, que multiplicados por el área de estudio (939.04 km²) da un volumen anual evapotranspirado de 496.57 hm³. El volumen de escurrimiento estimado como el producto del coeficiente de escurrimiento ($C_e = 0.1055$) por el volumen precipitado ($V_p = 611.06$ hm³/año) fue de 64.47 hm³/año. El periodo de tiempo que cubren los datos utilizados para el cálculo de cada variable climática fue de 47 años (de 1960 a 2007).

Método del balance hidrológico

Entrada total (E) de agua al acuífero

El cálculo obtenido en la estimación de las entradas de agua verticales al acuífero (E_v) fue de 106.74 hm³/año. Por lo que respecta a las entradas por flujo subterráneo horizontal (E_H), calculadas mediante la ecuación de Darcy, se obtuvo un valor de 18.08 hm³/año (figura 5, cuadro 2). Las líneas equipotenciales o de igual elevación del nivel estático se obtuvieron únicamente de 72 pozos monitoreados. La transmisividad utilizada fue de 0.001 m²/s. Cabe señalar que en el acuífero Texcoco no se han realizado suficientes pruebas de bombeo actuales, por lo que el valor de la transmisividad fue obtenido del estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca, en 2006. Este valor es muy variable. Un ejemplo claro de la variabilidad espacial de la transmisividad fue al determinar ésta mediante dos pruebas de bombeo realizadas en el Colegio de Postgraduados y en la Universidad Autónoma Chapingo. Las pruebas se llevaron a cabo en pozos de bombeo sin pozo de observación y en la etapa de recuperación (para que no influyera el efecto del bombeo), y se utilizó el método de Jacob, obteniéndose valores de la transmisividad para los pozos mencionados de 0.0452 y 0.0295 m²/s, respectivamente. Asimismo, en el año 2007, la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México de la Conagua, mediante un estudio

denominado “Pruebas de Bombeo en Pozos de la Cuenca del Valle de México”, realizó veinte pruebas de bombeo, de las cuales solamente una prueba se realizó exitosamente dentro del acuífero Texcoco (pozo 169, Plaza Principal de San Andrés Chiautla), obteniéndose una transmisividad de 0.00915 m²/s. Lo anterior refleja la incertidumbre en el cálculo de los volúmenes de entrada de agua por flujo subterráneo.

Salida total (S) de agua del acuífero

La suma de los volúmenes bombeados en todos los pozos existentes (V_{EAS}) se obtuvo de la base de datos proporcionada por el Organismo de Cuenca del Valle de México (obtenida del censo de aprovechamientos de agua subterránea, realizado en 2006), y analizada y comparada con la base de datos del REPDA. Los volúmenes de extracción por tipo de uso y aprovechamientos se presentan en el cuadro 3.

El volumen bruto de extracción de agua subterránea por este rubro es de 183.027 hm³/año. Estos volúmenes de extracción son obtenidos mediante 552 aprovechamientos, de los cuales 18 corresponden a manantiales, 5 son norias y 529 pozos profundos. La suma de volúmenes bombeados a través de pozos y norias es de 172.6 hm³/año. Los mayores volúmenes de extracción provienen del municipio de Texcoco (76.63 hm³/año), que representan el 41.87% del total, además de ser el municipio con mayor número de aprovechamientos, con un total de 312, que representa más del 50% en el acuífero.

La descarga natural comprometida (V_{DNC}) resultó ser de 10.40 hm³/año y es el volumen de agua extraído de los 18 manantiales ubicados en el municipio de Texcoco (cuadro 3).

Salidas horizontales de agua por flujo subterráneo (S_H). El valor de este componente, así como la determinación de los canales de salida (o entradas de flujo), se puede calcular mediante la ecuación de Darcy. El cálculo de

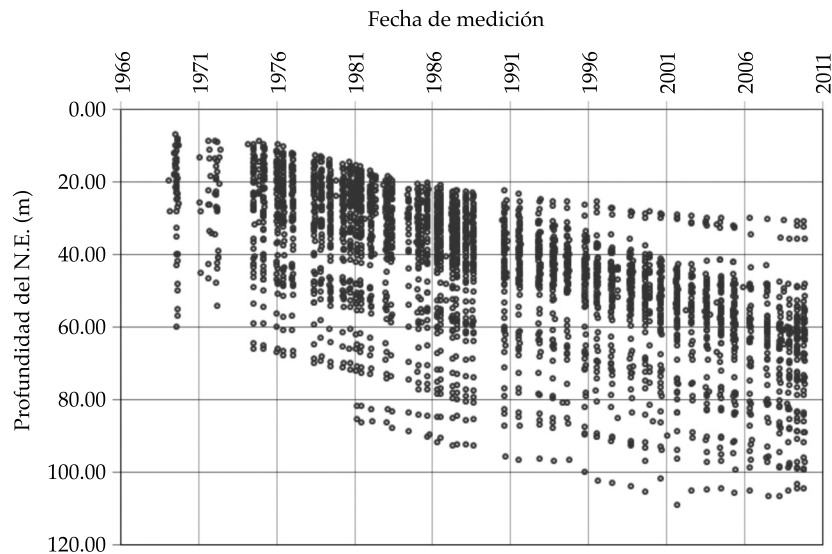


Figura 5. Abatimiento del nivel estático en 72 pozos de observación del acuífero Texcoco.

Cuadro 2. Volúmenes de entradas de agua subterránea por flujo horizontal.

Celda	Ancho (B_j) (m)	Largo ($L = \Delta s$) (m)	$h_{j+1} - h_j$ (m)	Gradiente hidráulico (i) $i_j = \frac{\partial h}{\partial L} = \frac{h_{j+1} - h_j}{\Delta s}$	Transmisividad (T) (m ² /s) $T_j = (k_j)(B_j)$	Caudal (Q) (m ³ /s) $Q_j = (T_j)(i_j)(B_j)$	Volumen (hm ³ /año)
E_1	7 269	3 338	20	0.0060	0.001	0.0436	1.37
E_2	2 957	1 125	20	0.0178	0.001	0.0526	1.66
E_3	5 900	2 450	20	0.0082	0.001	0.0482	1.52
E_4	15 184	708	20	0.0282	0.001	0.4289	13.53
Total							18.08

las salidas por flujo horizontal subterráneo fue del orden de 3.8 hm³/año (figura 5, cuadro 4).

Con base en lo anterior, la sobreexplotación del acuífero mediante el método del balance hidrológico de las entradas de agua menos las salidas resultó de -62.0 hm³/año; valor obtenido de la resta de 124.80 hm³/año como entradas de agua ($E_V + E_H = 106.74$ hm³/año + 18.08 hm³/año) y de 186.80 hm³/año como salidas ($V_{EAS} + S_H + V_{DNC} = 172.6$ hm³/año + 3.8 hm³/año + 10.40 hm³/año).

Evaluación de la sobreexplotación como cambio de almacenamiento (ΔV) determinado por el producto del coeficiente de almacenamiento (S) y la variación de la carga hidráulica (Δh)

De acuerdo con la ecuación (9), para obtener la evolución media del nivel estático o variación de la carga hidráulica (h_i), se monitorearon 72 pozos piloto de los 529 pozos de bombeo que cuentan con un periodo de registro de 1969 a 2009 (cuarenta años). El abatimiento de los

Cuadro 3. Extracciones de agua subterránea por municipio, tipo de uso y número de aprovechamientos.

Municipio	Tipo de aprovechamiento	Núm. de aprovechamientos	Extracción por usos (m³/año)					Extracción total por municipio (m³/año)
			Agrícola	Público urbano	Pecuario	Industrial	Usos múltiples y servicios	
1. Texcoco	Pozos	293	26 825 703	36 327 464	707 697	864 677	1 463 493	66 189 034
	Manantiales	18	7 264 948	3 100 934	0	0	66 951	10 432 833
	Norias	1	0	0	0	0	5 000	5 000
Subtotal		312	34 090 651	39 428 398	707 697	864 677	1 535 444	76 626 867
2. Atenco	Pozos	31	3 167 872	2 992 672	0	39 420	0	6 199 964
3. Chiautla	Pozos	36	2 332 717	2 516 474	25 128	0	94 608	4 968 927
	Norias	1	3 185	0	657	0	307	4 149
Subtotal		37	2 335 902	2 516 474	25 785	0	94 915	4 973 076
4. Chicoloapan	Pozos	37	1 315 634	17 690 592	35 936	6 371	30 411	19 078 944
5 Chiconcuac	Pozos	13	1 715 520	1 756 413	0	0	0	3 471 933
6. Chimalhuacán	Pozos	21	449 640	33 779 908	30 599	0	336 380	34 596 527
7. Ixtapaluca	Pozos	4	368 040	722 554	0	0	0	1 090 594
8. La Paz	Pozos	22	0	25 690 635	0	2 752 759	6 362	28 449 756
9. Nezahualcóyotl	Pozos	1	0	2 207 520	0	0	0	2 207 520
10. Papalotla	Pozos	7	447 178	634 662	0	0	41 731	1 123 571
11. Tepetlaotoc	Pozos	61	2 970 546	1 611 524	28 518	0	39 439	4 650 027
	Noria	3	64 800	0	0	0	8 343	73 143
Subtotal		64	3 035 346	1 611 524	28 518	0	47 782	4 723 170
12. Tezoyuca	15 184	3	350 120	131 400	0	0	4 000	485 520
Acuífero		552	42 275 903	129 162 751	828 535	3 663 227	2 097 025	183 027 441

Cuadro 4. Volúmenes de salidas de agua subterránea por flujo horizontal.

Celda	Ancho (B_j) (m)	Largo ($L = \Delta s$) (m)	$h_{j+1} - h_j$ (m)	Gradiente hidráulico (i) $i_j = \frac{\partial h}{\partial L} = \frac{h_{j+1} - h_j}{\Delta s}$	Transmisividad (T) (m²/s) $T_j = (k_j)(B_j)$	Caudal (Q) (m³/s) $Q_j = (T_j)(i_j)(B_j)$	Volumen (hm³/año)
S_1	11 671	3 828	20	0.0052	0.001	0.0610	1.92
S_2	7 347	2 437	20	0.0082	0.001	0.0603	1.90
Total							3.82

niveles estáticos medio computado, de 1.20 m/año, indica sin lugar a dudas que al acuífero se le extrae más agua que la que entra, sin embargo, se tuvieron valores mayores a 1 m/año en 63 pozos, con un máximo de 1.65 m/año, y solamente en nueve pozos se obtuvieron valores menores a 1 m/año. La figura 5 muestra el abatimiento en 72 pozos monitoreados y la figura 2 presenta la ubicación de estos pozos.

Cabe mencionar que para verificar la base de datos de los valores del nivel estático proporcionada por el Organismo de Cuenca

Aguas del Valle de México, del periodo de 1969 al 2007, fue necesario realizar mediciones adicionales en el periodo de 2008 a 2009 (dos mediciones por año, una en época de estiaje y una en el periodo de lluvias), con la finalidad de poder observar en las gráficas de abatimiento algún efecto de recarga, lo cual es indudablemente imposible, dado que el movimiento del agua a estratos muy profundos es muy lento (años) y se cree que posiblemente lo que estamos extrayendo ahora es lo que se recargó hace diez o veinte años,

aunado a la dinámica de la sobre-extracción de agua subterránea, que no permite lograr un equilibrio hídrico entre la recarga y la extracción.

Para el caso del coeficiente de almacenamiento (S), no se han realizado hasta la fecha en un número suficiente pruebas de bombeo en el acuífero Texcoco. En el estudio denominado “Apoyo Técnico para la Actualización de la Disponibilidad del Acuífero Texcoco” (Conagua, 2007), proponen un coeficiente de almacenamiento “regional” del 0.06. Para este estudio, a falta de información de pruebas de bombeo, se tomó el valor del coeficiente de almacenamientos proporcionado en el estudio mencionado anteriormente, de 0.06; indudablemente, este valor hay que tomarlo con muchas reservas, dado que no es un valor confiable que se haya obtenido de pruebas locales de bombeo. La suma o integración del producto del abatimiento, por el coeficiente de almacenamiento y por el área de la parte del acuífero con estos datos, proporciona el volumen de la sobreexplotación, también denominado “minado” del acuífero, que para este caso fue de $-67.61 \text{ hm}^3/\text{año}$.

El área utilizada en el cálculo mediante el método del balance hidrológico es el área del acuífero de 939.04 km^2 ; el año en que se realizó el balance fue 2010.

Discusión

Las estimaciones del grado de sobreexplotación de acuífero de Texcoco reportadas por la Conagua difieren de manera muy considerable, pues mientras que en el DOF de 2003 se menciona una recarga de $48.6 \text{ hm}^3/\text{año}$ y extracciones de $465.4 \text{ hm}^3/\text{año}$, en el DOF de 2009 estos valores cambian sustancialmente a $161 \text{ hm}^3/\text{año}$ de recarga y $184.20 \text{ hm}^3/\text{año}$ de extracción. Al investigar el origen de estas diferencias, se aclara que en los cálculos realizados en 2003 se incluyó la extracción del municipio de Ecatepec ($230.50 \text{ hm}^3/\text{año}$) y de la Delegación de Iztapalapa ($81.13 \text{ hm}^3/\text{año}$), donde habitan alrededor de dos millones de

personas. Estas áreas ya no se consideraron en los cálculos de 2009, por haber sido asignadas a otros acuíferos vecinos. Sin embargo, el aumento tan considerable en la recarga, que pasó de 48.6 a $161 \text{ hm}^3/\text{año}$, no tiene ninguna explicación lógica, pues no existen noticias de que se hubieran desarrollado intensas actividades para la recarga artificial. En cualquier caso, estos cambios en las cifras reportadas hacen que tal información carezca de confiabilidad.

Los valores obtenidos del grado de sobreexplotación del acuífero Texcoco mediante los dos métodos utilizados en este estudio resultaron muy cercanos de manera meramente circunstancial, ya que:

- a) El cálculo de la evapotranspiración real, que es uno de los componentes de la recarga vertical, generalmente se determina mediante métodos poco precisos, como la ecuación de Turc.
- b) El cálculo de los flujos subterráneos que requiere de la construcción de las curvas equipotenciales para definir gradientes en las celdas de entrada y salida de flujo de agua se ha venido realizando con información recabada en alrededor de ochenta pozos de bombeo, ubicados en la parte central del acuífero, por lo que los gradientes se obtienen mediante interpolación muy poco confiable. Además, la transmisividad utilizada de $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$ no fue medida localmente, sino que se tomó el valor obtenido para un acuífero vecino.
- c) El cálculo del volumen extraído se basa en un padrón incompleto y desactualizado de los pozos de bombeo, sin que se tenga una idea real de la cantidad de pozos clandestinos.
- d) Por lo que respecta al método basado en los abatimientos piezométricos y el coeficiente de almacenamiento, hay que señalar que sólo se cuenta con lecturas en la parte central del acuífero, por lo que la estimación de gradientes de flujo subterráneo a la entrada y salida del acuífero es muy incierta.

Además, el coeficiente de almacenamiento utilizado, de 0.06 para todo el acuífero, no fue obtenido localmente, sino que se utilizó un valor correspondiente a un acuífero vecino.

Conclusiones

El conocimiento preciso y confiable del grado de sobreexplotación de un acuífero es un elemento indispensable para diseñar un plan de manejo sustentable del mismo.

El cálculo de la sobreexplotación de un acuífero está sujeto a una gran incertidumbre, porque muchos de los parámetros de los que depende, como la recarga vertical, los flujos subterráneos, incluso la estimación de las extracciones, se conocen con muy baja confiabilidad.

La sobreexplotación de un acuífero puede estimarse mediante dos métodos: a) a través del balance hidrológico (que determina la sobreexplotación como la diferencia de las entradas menos las salidas de agua) y b) por el conocimiento de los abatimientos de los niveles piezométricos y el coeficiente de almacenamiento.

El método del balance hidrológico depende de numerosos parámetros que en la práctica son difíciles de estimar, como la recarga vertical —que a su vez está fuertemente definida por la evapotranspiración real—, y ni siquiera el volumen de extracción de los pozos es confiablemente conocido, por la existencia de pozos clandestinos, además de que muchos cálculos se realizan con fórmulas empíricas no siempre suficientemente calibradas y validadas localmente.

El método basado en el conocimiento de los abatimientos y del coeficiente de almacenamiento es más confiable que el método del balance de las entradas (recarga) menos las salidas (extracciones) debido a que depende de menos parámetros, además de que tales parámetros son menos difíciles de determinar.

Una deficiencia común a ambos métodos es el desconocimiento de parámetros geo-

hidrológicos como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, cuya determinación requiere de costosas pruebas de bombeo que nunca se realizan en cantidad suficientes.

Se considera una coincidencia que la aplicación de ambos métodos en el acuífero Texcoco haya dado resultados muy similares, dadas las incertidumbres y deficiencias de información señaladas anteriormente.

Recomendaciones

Sería deseable que en todos los estudios sobre el acuífero que otorga por contrato la Conagua fueran evaluados críticamente por terceras partes, para identificar y corregir errores, de manera que los datos que se publiquen en el DOF tengan mayor confiabilidad. Esto aplica también a la necesidad de mantener actualizadas y verificadas las bases de datos de los pozos de bombeo.

Establecer un programa de monitoreo de los niveles piezométricos y de su evolución en el tiempo. Esta información permite determinar la sobreexplotación del acuífero y los gradientes para el cálculo de las entradas y salidas de agua subterráneas.

Es urgente promover la realización de más pruebas de bombeo para conocer mejor la variación de los parámetros del acuífero, como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento.

Medir regularmente el gasto de las principales entradas y salidas superficiales de agua, para precisar los cálculos del balance hidrológico del acuífero.

Medir regularmente el gasto de las principales entradas y salidas superficiales de agua al lago Nabor Carrillo, a fin de poder determinar la infiltración hacia el acuífero de todas las superficies cubiertas de agua.

Promover la creación del Consejo Técnico de Aguas del Subsuelo (COTAS), así como de su Comité de Vigilancia, para identificar

y combatir pozos clandestinos o con uso diferente al que especifica la concesión.

Agradecimientos

El apoyo para la investigación presente fue proporcionado por el Proyecto 23585, Semarnat-Conacyt.

Recibido: 06/08/10

Aceptado: 07/11/11

Referencias

- CONAGUA. *Apoyo Técnico para la Actualización de la Disponibilidad del Acuífero Texcoco*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2007.
- CONAGUA. *Estudio de modelación para determinar el comportamiento de los acuíferos Texcoco y Chalco-Amecameca*. México, D.F.: Comisión Nacional del Agua, 2006.
- CRISTÓBAL, A.D. Comparación de métodos de interpolación en variables hídricas del suelo. *Agrociencias*. Vol. 30, núm. 3, julio-septiembre de 1996, pp. 329-343.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. *Hidrología Subterránea. Tomo 1*. Segunda edición. Barcelona: Editorial Omega, 1983.
- DOF. Segunda Sección. Artículo Tercero. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F., 31 de enero de 2003.
- DOF. Tercera Sección. Artículo Segundo. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F., 28 de agosto de 2009.
- MOOSER, F., MONTIEL, A. y ZÚÑIGA, A. *Nuevo mapa geológico de las cuencas del Valle de México, Toluca y Puebla*. México. D.F.: Comisión Federal de Electricidad, 1996.
- NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-011-CNA-2000. México, D.F.
- PEÑA, S. *Introducción a la Hidrología Subterránea*. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 2007.
- PDMT. *Plan de Desarrollo Municipal. Texcoco 2006-2009*. Texcoco, México: Ayuntamiento de Texcoco, 2006.
- PNH. *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*. México, D.F.: Conagua-Semarnat, 6 de agosto del año 2007.
- SEMARNAP-CONAGUA. *El agua en México: retos y avance*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca-Comisión Nacional del Agua, octubre de 2000.
- SEMARNAT-CONAGUA. *Estadísticas del agua en México*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional del Agua, 2008.
- SOKOLOV, A.A., HERAS, R. y CHAPMAN, T.G. *Métodos de Cálculo del Balance Hídrico*. México, D.F.: UNESCO, 1981.

Abstract

ESCOBAR-VILLAGRÁN, B.S. & PALACIOS-VÉLEZ, O.L. *Analysis of over-exploitation of the Texcoco aquifer, Mexico. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 2, April-June, 2012, pp. 67-84.*

The Texcoco aquifer is the main source of water for 12 municipalities in the eastern part of the Valley of Mexico, with a population of over 1.5 million inhabitants. The socio-economic development of this zone strongly depends on the possibility to achieve sustainable management of this aquifer, which at the present time is heavily over-exploited, although the real degree of over-exploitation is unknown. Since accurately knowing the extent of over-exploitation is indispensable in order to develop and implement a sustainable management plan for the aquifer, the aim of this work was to analyze the sources of uncertainties and errors in the estimation of over-exploitation. For this purpose, two methods were applied: a) the hydrologic balance method, consisting of measuring or calculating the different water inputs and outputs in the aquifer area, and b) the method to monitor the hydraulic head drawdown and knowledge of specific storage (in confined aquifers) or specific yield (in unconfined aquifers), determined by aquifer tests. As a result of the application of these methods, over-exploitation of 62 hm³/year was estimated using the first method and 67.6 hm³/year using the second. The similarity of the two values was a mere coincidence for several reasons: there are errors in the calculation of real evapotranspiration that should be subtracted from the precipitation volume in order to calculate vertical recharge; surface runoff to and from the aquifer area is not measured at the sites where it is needed; the hydrogeological aquifer characteristics are not measured in situ, but rather are taken from neighboring aquifers; there are not enough hydraulic head measurements to correctly estimate the gradient and the groundwater inflows and outflows. Even the volume of water extracted by the pumping wells is poorly determined, because of an unknown number of clandestine wells and the information corresponding to the registered wells is incomplete and not updated.

Keywords: aquifer sustainable management plan, over-exploitation calculation, aquifer characteristics, errors in the hydrologic balance.

Dirección institucional de los autores

M.C. Bernardo Samuel Escobar Villagrán
Dr. Óscar Luis Palacios Vélez

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Km 36.5 carretera México-Texcoco
56230 Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200
esamuel@colpos.mx
opalacio@colpos.mx