

Estimación de la sobreexplotación producida en el acuífero Valle de Celaya (México)

• J. Hilario Romero* • Oscar L. Palacios • Bernardo S. Escobar •
Colegio de Postgraduados, México

*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-04-08

Resumen

Romero, J. H., Palacios, O. L., & Escobar, B. S. (julio-agosto, 2017). Estimación de la sobreexplotación producida en el acuífero Valle de Celaya (México). *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(4), 127-138.

El acuífero Valle de Celaya se encuentra ubicado en el estado de Guanajuato, México, en una región denominada "El Bajío" y es la principal fuente de abastecimiento de agua de once municipios (Apaseo el Alto, Apaseo el Grande, Celaya, Comonfort, Cortázar, Jaral del Progreso, Juventino Rosas, San Miguel Allende, Salamanca, Tarimoro y Villagrán), con una población aproximada de un millón de habitantes. El desarrollo de estos municipios depende en buena medida del manejo sustentable de los recursos hídricos, sobre los cuales existe una zona de veda desde 1949. Dados los grandes cambios observados en esta región, es necesario actualizar el estudio hidrológico existente, ya que además se han modificado los límites del acuífero, el cual se fusionó con el acuífero de los Apaseos en el año 2003. El objetivo de este trabajo fue estimar el grado de sobreexplotación para el año 2013, como paso indispensable para elaborar un plan de manejo sustentable, para lo cual se aplicaron dos métodos: a) el método de balance hidrológico, que consiste en medir o calcular las diferencias entre las entradas y salidas del agua del acuífero, y b) el método de análisis de la evolución de niveles de agua, donde la sobreexplotación se determina a partir del producto del abatimiento medio en un tiempo dado, multiplicado por el coeficiente de almacenamiento. Como resultado de la aplicación del primer método se obtuvo una sobreexplotación de 440.78 Mm³ mientras por el método de evolución de niveles de agua se obtuvo una cifra de 386.58 Mm³. Sin embargo, ambos valores son sólo crudas estimaciones de la sobreexplotación real debido a la falta de información actualizada del censo de aprovechamientos y a la escasez de información geohidrológica; tampoco se cuenta con datos reales ni del gradiente hidráulico ni del valor de la transmisividad en la periferia del acuífero, parámetros indispensables para calcular las entradas y salidas horizontales mediante la ley de Darcy.

Palabras clave: acuífero, sobreexplotación, balance hidrológico, evolución de niveles de agua.

Abstract

Romero, J. H., Palacios, O. L., & Escobar, B. S. (July-August, 2017). Estimation of groundwater overexploitation produced in the Celaya Valley (México). *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(4), 127-138.

The Celaya Valley aquifer is located in the State of Guanajuato, Mexico, in a region known as "El Bajío", and is the main source of water supply for eleven municipalities (Apaseo el Alto, Apaseo el Grande, Celaya, Comonfort, Cortazar, Jaral del Progreso, Juventino Rosas, San Miguel Allende, Salamanca, Tarimoro and Villagrán) with a total population of about one million inhabitants. The development of these towns strongly depends on the sustainable management of their natural resources, particularly the hydraulic resources for which there is a ban since 1949. In view of the development of the region and the many changes observed there is a need to update the hydrologic study, since the aquifer boundaries have changed and the Celaya aquifer was joined with the Apaseos' Valley aquifer in 2003. The purpose of this study was to estimate the sources of uncertainty and the real degree of groundwater overexploitation, as the basis for establishing a sustainable management plan. Two approaches were applied: a) the method of water balance, in which the different water inputs and outputs are to be measured or calculated, and b) a method based on the analysis of the evolution in time of the aquifer water levels, since the overexploitation is equal to the mean lowering of the water levels during a giving time, multiplied by the storage coefficient. As a result of the application of the water balance method a groundwater overdraft of 440.78 Mm³ was obtained. On the other hand, by the method based on the evolution of the water levels an overdraft of 386.65 Mm³ was obtained. Actually both values are just a crude estimation of the real overexploitation because of the incompleteness of the data base of acting pumping wells, the scarcity of geohydrological information regarding the transmissivity and storage coefficient of the aquifer, and also due to the almost complete absence of information regarding the water levels and the hydraulic gradients and transmissivity in the boundaries of the aquifer, needed to assess the horizontal groundwater inputs and outputs by means of the Darcy's Law.

Keywords: Aquifer, groundwater overexploitation, water balance, water level evolution.

Recibido: 12/02/2016
Aceptado: 04/02/2017

Introducción

Según estadísticas del agua en México (Conagua, 2013), el número de acuíferos sobreexplotados se ha incrementado a través del tiempo, llegando en la actualidad a 106 acuíferos sobreexplotados; de estos acuíferos se extrae 54.72% del agua subterránea para diferentes usos. El acuífero Valle de Celaya se ubica dentro de la cuenca Laja, perteneciente a la región hidrológica administrativa número VIII Lerma-Santiago-Pacífico. En esta región se delimitaron 128 acuíferos, de los cuales 32 están sobreexplotados, incluyendo al acuífero Valle de Celaya.

Los acuíferos sobreexplotados, en específico el acuífero Valle de Celaya, presentan las siguientes consecuencias: agotamiento de manantiales; mayores profundidades de bombeo de pozos; aumento en los costos de bombeo; subsidencias de 1.5 cm/año en el centro de Celaya (SARH, 1980); mala calidad de agua en la parte oriente de Celaya y la comunidad de Tenería del Santuario; modificación en el esquema natural de flujo; incremento en los costos de conducción de agua potable y alcantarillado por subsidencias; daño en monumentos históricos, y escasez de agua.

Por otro lado, es importante mencionar que en estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (Conagua) durante los años 1995 y 2000, el acuífero Valle de Celaya estaba dividido en dos acuíferos: el Valle de Apaseos (1995) y el Valle de Celaya (2000), separados por el río Laja. Sin embargo, en un análisis posterior, realizado en 2003 por la misma Comisión (*Cuantificación de la extracción de agua subterráneas en el Valle de Celaya; Gto.*) (Gondwana Exploraciones, S.C., 2003), ya aparecen unificados como un solo acuífero, cuyas coordenadas (20 vértices) se publicaron el 31 de enero de 2003 en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF). Aun cuando ya se habían establecido los nuevos límites del acuífero Valle de Celaya en 2003, el 28 de agosto de 2009 se publicó en el DOF la disponibilidad media anual de agua subterránea para este acuífero y se modificaron de nueva cuenta sus límites (24 vértices); así, se cuantifica el volumen de extracción de agua subterránea en 593 Mm³/

año, valor que no considera las extracciones de la zona del Valle de Apaseos (279 Mm³/año en el año 2000). Lo anterior muestra que no se han efectuado estudios confiables de la disponibilidad de agua subterránea en el acuífero Valle de Celaya.

Dada la incongruencia en la cuantificación y valoración de la información referente a la disponibilidad de agua subterránea y su balance del acuífero Valle de Celaya, el objetivo de esta investigación fue estimar el grado de sobreexplotación del acuífero por dos métodos: a) el método del balance hidrológico y b) el método de evolución de niveles de agua para el año 2013.

Descripción del marco físico

Definición del área que comprende el acuífero de Valle de Celaya

El área de estudio se localiza en el estado de Guanajuato, en el centro del país. Está delimitada entre las coordenadas -101° 5' 29", -100° 28' 52" de longitud y 20° 20' 12", 20° 51' 57" de latitud. El acuífero tiene un área de 2 811 kilómetros cuadrados. Su localización se muestra en la figura 1 y para su elaboración se procesó una imagen Landsat de la zona de estudio del año 2013. Dentro del polígono del acuífero se encuentran 11 municipios, con una población cercana a un millón de habitantes. El acuífero Valle de Celaya está comunicado hacia el norte con los acuíferos de San Miguel Allende y cuenca de alto río Laja; al sur con Acámbaro, la Cuevita y Salvatierra; al oeste, con Valle de Irapuato, y al este con el estado de Querétaro; lo cruzan los ríos Laja, Lerma y Querétaro, y los distritos de riego 085 La Begoña y 011 Lerma.

Tipo de acuífero

De acuerdo con el estudio de 2003 de Gondwana Exploraciones, S.C., en la década de 1970, el acuífero Valle de Celaya se comportaba como acuífero libre, estando conformado por materiales aluviales, lacustres y volcanoclásticos; pero en la actualidad, debido a la sobreexplotación del acuífero, en algunas zonas se comporta

como semiconfinado por los cuerpos arcillosos o bien por los flujos de lava. En el área de los Apaseos se considera confinado, dado que las fracturas no están totalmente abiertas a la superficie sino selladas por precipitación de calcita o por sedimentos lacustres.

Elevación del nivel estático

La configuración de las curvas de igual elevación de los niveles estáticos, elaborada con los datos de 96 pozos de observación ubicados dentro y fuera del polígono del acuífero, representa las equipotenciales de la red de flujo subterráneo (figura 2). El agua subterránea del acuífero Valle de Celaya, según las configuraciones de los niveles estáticos del año 2013, presenta un flujo horizontal con dirección general de este a oeste, con algunos conos de abatimiento causados por la sobreexplotación en las inmediaciones del río Laja entre Celaya y Apaseo el Grande.

Pruebas de bombeo

En el acuífero Valle de Celaya se realizaron 34 pruebas de bombeo, de las cuales 21 corresponden al Valle de Celaya (Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V., 1999) y 13 al Valle de los Apaseos (Lesser y Asociados, S.A. de C.V., 1995). El resultado de las pruebas de bombeo permitió caracterizar el acuífero desde el punto de vista geohidráulico, cuya variabilidad en la transmisibilidad comprende un mínimo de $4.26 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ y un máximo de $0.154 \text{ m}^2/\text{s}$; y un coeficiente de almacenamiento del orden de 0.0141 como mínimo y 0.494 como máximo. Se estimó un valor promedio regional del coeficiente de almacenamiento de 0.076, interpolando por el método de distancias inversas al cuadrado en todo el polígono del acuífero (figura 3).

Metodología

Determinación de las características climáticas

Las características climáticas determinadas fueron la precipitación promedio histórica anual,

temperatura media histórica anual y evapotranspiración real. Esta información se generó a partir de datos de 23 estaciones climáticas distribuidas dentro y fuera del polígono del acuífero. Los valores de estas variables (precipitación y temperatura) se obtuvieron de la base de datos climáticos nacional (Clicom, 2013). El cálculo de la evapotranspiración real se realizó utilizando el método de Turc, establecido en la Norma Oficial Mexicana (DOF, 2015) mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

- ETR = evapotranspiración real (mm/año).
- P = precipitación media anual (mm/año).
- L = $300 + 25 T + 0.5T^3$.
- T = temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$).

Con los datos obtenidos de las 23 estaciones climáticas se realizó una interpolación para cada píxel del área del acuífero de las variables climáticas de precipitación y temperatura, utilizando el método de vecino natural (Childs, 2004).

Método de balance hidrológico

El grado de sobreexplotación del acuífero se puede determinar mediante la ecuación de balance hidrológico, la cual, expresada en su forma más general, es:

$$E - S = \Delta A \quad (2)$$

Donde:

- E = entradas totales de agua al acuífero.
- S = salidas totales de agua del acuífero.
- ΔA = cambio de almacenamiento (sobreexplotación cuando $S > E$).

Las entradas totales de agua (E) al acuífero se pueden expresar con la siguiente ecuación:

$$E = I_e + R_{iag} + R_{ipu} + I_{río} + E_h \quad (3)$$

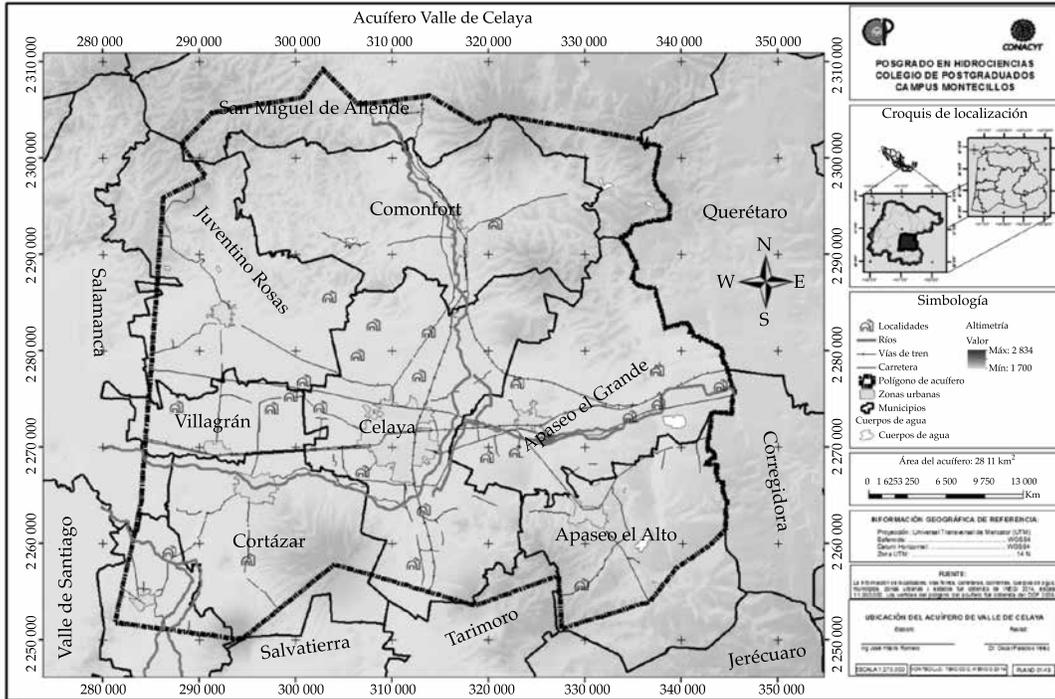


Figura 1. Acuífero Valle de Celaya.

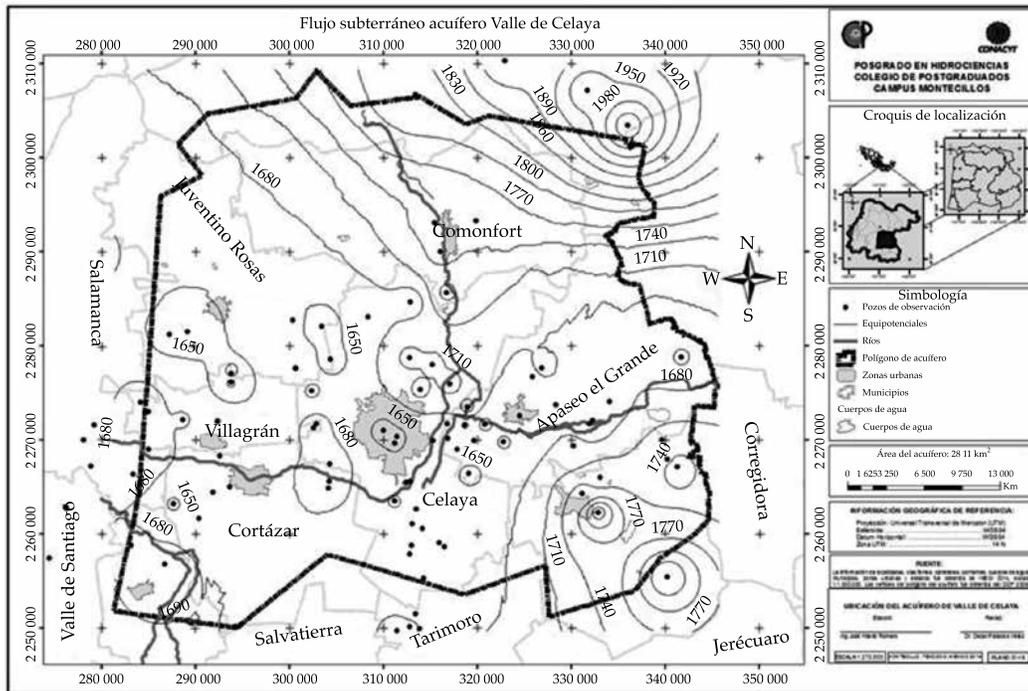


Figura 2. Equipotenciales del flujo de agua subterránea.

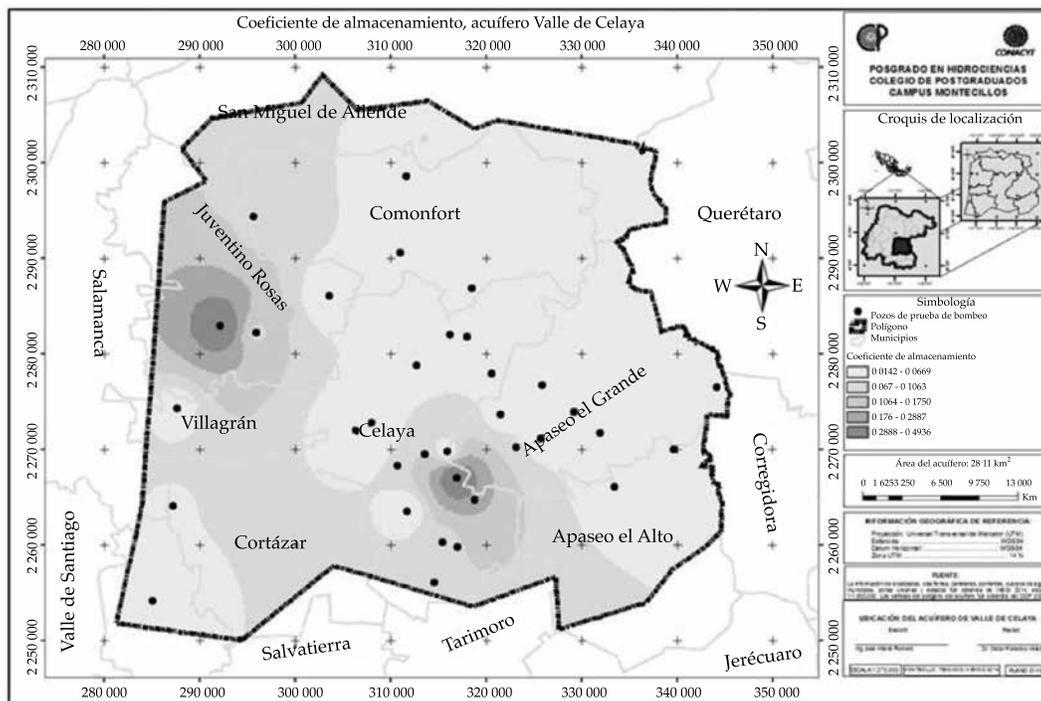


Figura 3. Coeficiente de almacenamiento.

Donde (I_e) es la infiltración efectiva de la precipitación. Su magnitud se calcula como el producto del coeficiente de escurrimiento (C_e) por la diferencia de la precipitación sobre el área del acuífero (V_p) y el volumen evapotranspirado por los cultivos agrícolas y la vegetación natural (V_{ETR}) (Custodio & Llamas, 1983):

$$I_e = C_e (V_p - V_{ETR}) \quad (4)$$

(R_{iag}) retorno inducido por uso agrícola

Es el volumen de agua infiltrado al acuífero debido a las pérdidas de agua en la conducción de los sistemas de irrigación utilizados en la agricultura dentro del área de estudio. La empresa Gondwana Exploraciones, S.C. (2003) muestreó 3 600 hectáreas, reportando que el porcentaje de retorno es de 25.85%.

(R_{ipu}) retorno inducido por uso público-urbano

Se pudiera deducir si existieran aforos suficientes en los puntos estratégicos. Como en general no se tienen los datos suficientes para asumir la eficiencia en la conducción, la Junta de Alcantarillado y Agua Potable de Celaya (Juamapa, 2009) asume una pérdida de agua por conducción en las tuberías de 40%.

(I_{rio}) infiltración proveniente de ríos

Es el volumen infiltrado a lo largo del cauce del río Laja, el cual se determina por la diferencia entre el volumen medido de la estación hidrométrica la Begoña ($V_{BEGOÑA}$) y la suma del volumen utilizado para regar el distrito de riego 085 la Begoña (V_{DR085}), más el volumen de agua evaporada a lo largo del río (V_{EVAP}) y el volumen

de agua que pasa por la estación hidrométrica Tres Guerras a la entrada de la ciudad de Celaya ($V_{3\text{GUERRAS}}$) (Estudio Hidrológico y Modelo Matemático del Acuífero Valle de Celaya, Gto., 1999, Conagua; Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V., 1999):

$$I_{\text{río}} = V_{\text{BEGOÑA}} - V_{\text{DR085}} - V_{\text{EVAP}} - v_{3\text{GUERRAS}} \quad (5)$$

(E_H) entradas horizontales subterráneas de agua al acuífero

La magnitud de este componente se puede calcular mediante la ecuación de Darcy (Fitts, 2002), conociendo la transmisividad (T) (m^2/s) tanto en la periferia como en la base del acuífero, así como los gradientes hidráulicos (i) en la periferia del acuífero:

$$E_H = \sum_{j=1}^{nc} T_j * a_j * i_j \quad (6)$$

En la ecuación (6), a es el ancho del canal de flujo (m) y nc es el número de canales de flujo de entrada, definidos en la periferia del área de balance. Los gradientes hidráulicos (i) se estimaron interpolando con el método de las distancias inversas al cuadrado los valores de niveles estáticos obtenidos de 97 pozos de monitoreo ubicados dentro y fuera del acuífero. Dicho procedimiento da una idea de los gradientes hidráulicos en la periferia del acuífero, pero para un cálculo más preciso es necesaria la medición de este parámetro y la transmisividad mediante un número mayor de pruebas de bombeo, así como un mayor número de pozos piezométricos, para tener información más exacta y real posible.

Las salidas totales de agua (S) del acuífero se pueden expresar mediante la siguiente ecuación:

$$S = Q_p + V_{\text{DNC}} + S_H \quad (7)$$

Donde (Q_p) salidas de aprovechamientos subterráneos es la suma de volumen de agua subterránea por unidad de tiempo de todos los aprovechamientos de bombas y norias existentes dentro del área del acuífero; la obtención de

este dato es muy complicado por las siguientes razones:

- Falta de un censo de aprovechamientos completo y actualizado.
- Existencia de pozos clandestinos que no cuentan con un título de concesión de aguas subterráneas y no reportan ante la autoridad el volumen extraído del acuífero.
- Falta de campañas de monitoreo y verificación del buen funcionamiento de los medidores de flujo, pues por lo regular un porcentaje considerable no funciona de modo adecuado, mostrando errores en el volumen extraído.

Dada la subjetividad en los datos de los censos de aprovechamientos de agua subterránea realizados en los diversos estudios por Conagua, se consideró conveniente hacer una estimación del consumo hídrico en la agricultura, al ser el principal uso de agua en el acuífero, a fin de complementar la información faltante del volumen extraído de agua subterránea; este consumo hídrico se estimó mediante la ecuación (8) utilizada en el estudio "Cuantificación de la extracción de agua subterráneas en el Valle de Celaya, Guanajuato (2003)" (Gondwana Exploraciones, S.C., 2003):

$$Rr = Et * Kc * Ks - Pe - Mf \quad (8)$$

Donde:

- Rr = requerimientos de riego.
- Et = evapotranspiración de referencia, calculada por el método Blaney-Cridle (Blaney & Cridle, 1950).
- Kc = coeficiente de consumo de agua del cultivo, que depende de su grado de desarrollo.
- Ks = coeficiente que depende de las condiciones de humedad del suelo.
- Pe = precipitación efectiva, calculada con la metodología de Ogrosky y Mockus (1964).
- Mf = aportes del manto freático. Para el acuífero en estudio, se consideró nulo, pues los niveles de agua subterránea se

encuentran a profundidades superiores a los 20 m (información tomada de dicho estudio).

Una vez calculado el requerimiento de riego, se determinó la lámina de riego bruta, empleando la siguiente expresión:

$$Lrb = \frac{Rr}{Efc * Efa} \quad (9)$$

Donde:

Lrb = lámina de riego bruta.

Rr = requerimiento de riego.

Efc = eficiencia de aplicación.

Efa = eficiencia de conducción.

Las láminas brutas obtenidas para los cultivos en los ciclos primavera-verano, otoño-invierno y perennes se multiplicaron por las superficies de cada cultivo, con lo cual se obtuvo el volumen aplicado a cada uno de ellos; sumando estos volúmenes se obtuvo el volumen de agua consumido para la agricultura. Por último, se utilizó la siguiente identidad para obtener el volumen regado con aguas subterráneas:

$$V_{SUB} = \frac{(A_t - A_s)}{A_t} * V_t \quad (10)$$

Donde:

V_{SUB} = volumen de agua de origen subterráneo.

A_t = área total sembrada cada año.

A_s = área regada con agua superficial en las unidades de riego (Gondwana Exploraciones, S.C., 2003).

V_t = requerimiento de volumen de agua calculado.

S_H = salidas horizontales del acuífero. 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 ya mencionadas, mediante la ecuación de Darcy.

V_{DNC} = descarga natural comprometida, que corresponde a la suma de los volúmenes de agua concesionada de los

manantiales y el caudal base de los ríos comprendidos en la unidad hidrogeológica evaluada, que estén comprometidos como agua superficial para diferentes usos.

Método de la evolución de niveles de agua en el acuífero

La sobreexplotación de un acuífero también se puede medir de forma directa, sin necesidad de calcular recarga y extracciones, a partir de la siguiente expresión (Harbaugh, 2005):

$$\Delta A = \sum_{i=1}^{nc} a_i * h_i * S_i \quad (11)$$

Donde:

ΔA = cambio de almacenamiento (sobreexplotación cuando ΔA es negativo) ($m^3/año$).

nc = número de celdas.

a_i = área de celda (m^2).

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

S_i = coeficiente de almacenamiento (adimensional).

Para esto se requieren básicamente dos tipos de datos:

1. La evolución de los niveles piezométricos del acuífero, también denominada variación de la carga hidráulica (h). Es importante contar con un programa de mediciones de los niveles de agua tanto en pozos de bombeo como en pozos de observación. Lo ideal es que las mediciones de los niveles de agua en los pozos de bombeo activos se realizara antes de los periodos de bombeo, a fin de no confundir los niveles estáticos con los niveles dinámicos de los conos de abatimiento que se generan durante la operación de los pozos. Si la evolución de los niveles de agua acusa una tendencia hacia el abatimiento continuo, se trataría de un signo inequívoco de que hay una sobreexplotación del acuífero.

2. El coeficiente de almacenamiento (S) y sus variaciones a lo largo y ancho del acuífero, el cual se obtiene por pruebas de bombeo, de las cuales frecuentemente se carece en cantidad suficiente debido a su alto costo.

Resultados

Determinación de las características climáticas

La precipitación media anual obtenida para la zona fue del orden de 739 mm; la temperatura media anual es del orden de 18.45 °C, con la cual se obtuvo un valor de la evapotranspiración real, calculada por el método de Turc, de 630 mm/año, en 2013.

Estimación de la sobreexplotación por el método del balance hidrológico

Las entradas totales de agua al acuífero (E) fueron de 631.27 Mm³, calculadas mediante la ecuación (3). Las entradas verticales son de 317.15 Mm³, provenientes de la suma de infiltración efectiva (I_e), que fue de 10.1 Mm³; los retornos inducidos por el riego en la agricultura (R_{iq}) de 265.25 Mm³; las pérdidas de agua en la conducción en los sistemas de agua potable y alcantarillado (R_{ipu}) de 37.4 Mm³, y la infiltración

por el río Laja (I_{rio}) de 1.37 Mm³. Las entradas horizontales desde otros acuíferos vecinos (E_H) resultó de 317.15 Mm³, aunque se debe aclarar que su cálculo es altamente dependiente de los valores de los gradientes de la carga hidráulica en la periferia del acuífero y dada la falta de pozos de observación en dicha periferia, la carga hidráulica y los gradientes se estimaron mediante interpolación de datos obtenidos, principalmente en la parte central del acuífero. Debe, pues, aclararse, que este dato es de precisión desconocida.

Las salidas totales de agua del acuífero (S) son del orden de 1 072.05 Mm³; las extracciones de agua subterránea (Q_p) son de 939.26 Mm³, obtenidos de 2 455 aprovechamientos de acuerdo con el censo de 2003, y actualizado con los valores de evapotranspiración agrícola y uso público urbano en 2013. El cuadro 1 muestra las extracciones de agua por aprovechamientos de bombeo clasificados por uso y municipio; sin embargo, en el municipio de San Miguel Allende no se registran pozos dentro del acuífero. El principal uso del agua subterránea es la agricultura, con un 89.71%. La figura 4 presenta la relación de los principales cultivos sembrados en el acuífero con su requerimiento de agua; cabe destacar que la alfalfa requiere 550 Mm³, cultivo que es destinado para uso ganadero. Si en lugar de este cultivo se introdujeran otros cultivos pa-

Cuadro 1. Extracciones de agua subterránea del acuífero Valle de Celaya.

Municipio	Extracciones de agua subterránea por tipo de uso y municipio (Mm ³)			
	Agrícola	Industrial	Público-urbano	Total general
Celaya	249.27	7.58	41.26	298.12
Apaseo el Grande	154.45	1.86	8.32	164.63
Villagrán	115.31	3.77	4.78	123.86
Cortázar	92.41	1.55	5.03	98.98
Juventino Rosas	78.66	0.64	14.90	94.20
Comonfort	52.47	0.00	9.70	62.17
Apaseo el Alto	42.33	0.16	6.49	48.97
Jaral del Progreso	39.67	0.00	2.73	42.40
Salamanca	2.16	0.00	0.32	2.48
Valle de Santiago	0.96	0.00	0.00	0.96
Salamanca	2.16	0.00	0.32	2.48
Total general	829.86	15.56	93.84	939.26

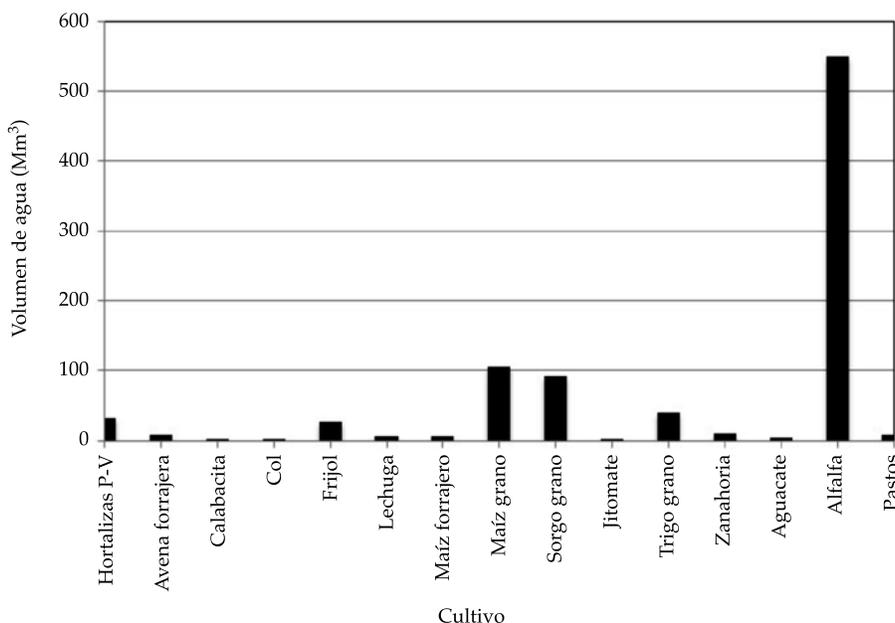


Figura 4. Consumo de agua de los principales cultivos del acuífero en 2013.

ra uso humano, con menores requerimientos de agua y mayor rentabilidad, se podría reducir el consumo hídrico en la agricultura. El municipio de Celaya extrae el 32% del volumen total, siendo el lugar donde se concentra la mitad de la población, agricultura e industria del acuífero. El volumen de descarga natural comprometida (V_{DNC}) es de 1.75 Mm³ y las salidas horizontales hacia otros acuíferos de la periferia (S_H) son de 131.04 Mm³, cantidad sobre la cual se pueden hacer las mismas observaciones señaladas anteriormente para las entradas subterráneas desde acuíferos vecinos.

El cambio de almacenamiento (ΔA) da un minado del acuífero o sobreexplotación de 440.78 Mm³, que es el resultado de la diferencia de entradas menos salidas al acuífero Valle de Celaya, estimado mediante la ecuación (2).

Estimación de la sobreexplotación por el método de la evolución de niveles de agua en el acuífero

De acuerdo con la ecuación (11), para obtener la evolución media del nivel estático o variación

de la carga hidráulica (h), se monitorearon 76 pozos de la red de la Comisión Estatal de Agua del Estado de Guanajuato (CEAG) de los 2 376 pozos activos que se localizan dentro del acuífero, en el periodo de 2005 a 2013. El abatimiento medio de los niveles estáticos promedio anual es de 1.77 m/año y específicamente en 2013, el nivel estático promedio estaba a los 93 metros de profundidad, lo cual es un claro indicador de que se extrae más agua de la que se recarga. En el cuadro 2 se muestra el promedio de niveles estáticos por municipios, donde Apaseo el Grande y Juventino Rosas son los que presentan los mayores abatimientos, no porque sean los municipios que extraigan más agua, sino por la geología de la zona, donde existen basaltos fracturados. La figura 5 es una representación de los pozos que tienen abatimientos del nivel estático (NE) mayores de dos metros y donde el nivel del agua muestra una tendencia clara a profundizarse.

El coeficiente de almacenamiento (S) de cada celda del acuífero se interpoló de las pruebas realizadas en los años 1995 y 1999. La suma o integración del producto del abatimiento por el

Cuadro 2. Profundidades de nivel estático de 2005 a 2013.

Municipio	Núm. pozos piloto	Promedio anual de profundidad nivel estático (m)								
		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Apaseo El Grande	19	97.74	100.48	102.46	105.68	107.43	110.16	112.44	115.98	117.01
Juventino Rosas	7	93.25	95.60	97.68	87.91	101.97	104.16	106.27	109.05	111.16
Celaya	25	85.88	87.60	88.84	89.22	88.93	90.49	91.75	95.89	98.00
Apaseo El Alto	5	75.61	76.83	77.86	79.80	79.88	81.72	84.61	86.48	89.79
Villagrán	6	60.66	62.04	60.97	62.33	66.46	68.92	70.82	77.53	78.56
Cortázar	7	63.40	64.57	65.17	66.94	64.38	67.06	68.08	69.11	72.52
Comonfort	4	32.75	35.25	36.00	36.50	36.75	37.74	38.34	42.48	44.04
Jaral del Progreso	2	22.66	24.47	24.96	25.64	26.03	28.77	30.09	31.58	32.43
Salamanca	1	23.00	24.00	26.00	26.00	24.00	27.00	23.20	28.00	30.85
Total general	76	79.50	81.46	82.67	83.14	84.87	86.99	88.62	92.19	94.10

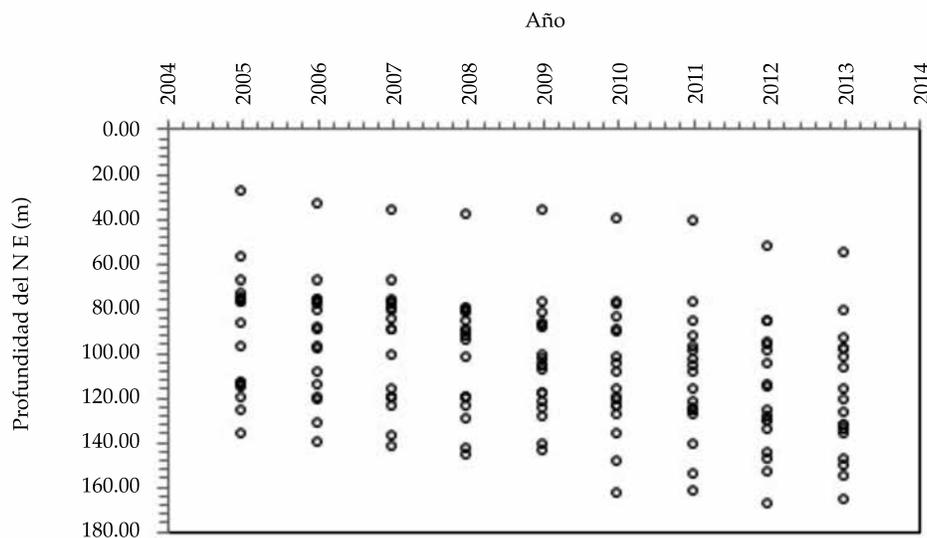


Figura 5. Abatimientos del nivel estático mayores de 2 m/año en 15 pozos de observación.

coeficiente de almacenamiento y por el área de la parte del acuífero proporciona el volumen de la sobreexplotación, que resultó de una magnitud de 386.58 Mm^3 , donde el municipio de Celaya registra el 23.13% de la región con 89.49 Mm^3 y en el municipio de Valle de Santiago registra el menor cambio de almacenamiento.

Discusión

El cálculo de la sobreexplotación del acuífero Valle de Celaya por el método de balance hidrológico resultó de 440.78 Mm^3 y por el método de

análisis de la evolución de niveles de agua dio una magnitud de 386.58 Mm^3 . En general, este segundo método suele ser más preciso que el método del balance de agua, porque requiere menos datos.

En el *Diario Oficial de la Federación* (DOF, 2008) se reporta que en el acuífero Valle de Celaya hay un minado de acuífero del orden de 306 Mm^3 y estudios realizados por las empresas Lesser y Asociados, S.A. de C.V., e Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V. estiman una sobreexplotación de 404 Mm^3 , mientras que en el presente estudio resultó de 386.58 Mm^3 .

Dichas variaciones muestran la gran incertidumbre de esta estimación y señalan la necesidad de darle más atención al monitoreo de los niveles de agua tanto en las partes centrales del acuífero como en su periferia, al igual que en la determinación de las características geohidrológicas del acuífero, como transmisividad y coeficiente de almacenamiento. Es igualmente importante actualizar el censo de pozos de bombeo y la estimación de la extracción desde pozos clandestinos.

Entre los problemas que tiene el método del balance hidrológico se pueden mencionar los siguientes:

- a) El cálculo de la evapotranspiración fue realizado por el método de Turc, que no es preciso, en comparación con otros métodos, como el de Penman-Monteith, que desafortunadamente requiere de información de la que no siempre se dispone.
- b) No existe información real obtenida de piezómetros del gradiente hidráulico en la periferia del acuífero; la interpolación realizada a partir de los datos de 76 pozos de observación ubicados en el centro del acuífero y 20 pozos de acuíferos colindantes no da confiabilidad, sobre todo al cálculo de gradientes necesarios (conjuntamente con la transmisividad) para el cálculo de flujos mediante la fórmula de Darcy.
- c) No se cuenta con un censo de aprovechamientos de aguas subterráneas actualizado, pues el último censo llevado a cabo fue en el año 2000; además, se desconocen las extracciones de un número importante de pozos clandestinos en la zona.

Conclusiones

Puede decirse que la sobreexplotación del acuífero Valle de Celaya es de aproximadamente 400 millones de $m^3/año$. Con la información disponible no tiene mucho sentido señalar una cifra más precisa.

En el caso específico del acuífero Valle de Celaya, que en 2003 se fusionó con el acuífero Valle de Apaseos, la Conagua no reportó las extracciones combinadas de estos acuíferos en la disponibilidad de aguas subterráneas publicadas en el DOF, situación que se puede repetir con otros acuíferos.

Con la información disponible es posible, sin embargo, señalar algunos cambios que pueden ayudar a reducir la sobreexplotación, como la modificación de cultivos de alto consumo de agua, como la alfalfa, por otros con menores requerimientos hídricos y con mayor rentabilidad económica.

Es de suma importancia dar apoyo para tecnificación y capacitación al campo, pues más de 80% del agua extraída del acuífero es para el sector agrícola; así, deben apoyarse todas las campañas sobre el ahorro del agua que puedan llevar a cabo tanto en el sector gubernamental como en el privado.

Recomendaciones

1. Actualizar un censo de aprovechamientos subterráneos con la información más completa y real posible (propietario, título, coordenadas, volumen, altura de brocal, etc.).
2. Crear una batería de pozos de observación en la periferia del acuífero para determinar gradientes del flujo subterráneo.
3. Crear un sistema Pokayoque "a prueba de errores" para las cuadrillas que verifican el nivel estático en los pozos que designan las "autoridades", a fin de evitar errores de medición, ya sea por factores humanos, materiales y/o técnicos (Torres, 2011).
4. Crear obras de captación de agua de lluvia para abastecer al menos parte de la demanda doméstica y para agricultura de traspatio en zonas rurales.
5. En el acuífero Valle de Celaya, el principal cultivo es la alfalfa, con un consumo hídrico de $550 Mm^3$, por lo que es importante hacer campañas orientadas a reducir el consumo de carne, pues se sabe que la alfalfa es uno de los principales alimentos del ganado y

por cada kilo de carne de res se requiere, en promedio, alrededor de 15 500 litros de agua para su producción (Conagua, 2008).

Agradecimientos

A Conacyt, por el apoyo económico en esta investigación y crear oportunidades para los jóvenes mexicanos, para desarrollar investigación para el desarrollo del país.

Referencias

- Blaney, H., & Criddle, W. (1950). *Determining water requirements in irrigation area from climatological and irrigation data*. Washington, DC: USDA.
- Childs, C. (2004). *Interpolating surfaces in ArcGIS spatial analyst*. Redlands, USA: ESRI Education Services.
- Clicom (2013). *Base de datos climatológica nacional (Sistema Clicom)*. Recuperado de <http://clicom-mex.cicese.mx/>.
- Conagua (2013). *Estadísticas del agua en México*. México, DF: Comisión Nacional de Agua.
- Custodio, E., & Llamas, R. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomo I. Barcelona: Omega.
- DOF (2008). *Actualización de la disponibilidad media actual de agua subterránea del acuífero (1115) Valle de Celaya, estado de Guanajuato*. México, DF: Diario Oficial de la Federación.
- DOF (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2015, Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales*. México, DF: Diario Oficial de la Federación.
- Fitts, C. (2002). *Groundwater science*. San Diego: Academic Press.
- Gondwana Exploraciones, S.C. (2003). *Cuatificación de la extracción del agua subterránea en el valle de Celaya, Guanajuato*. México, DF: Gondwana Exploraciones, S.C.
- Harbaugh, A. (2005). *Modflow-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground Water Model- the Ground Water Flow Process*. Reston, USA: USGS.
- Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V. (1999). *Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del valle de Celaya*. Guanajuato, México: Ingeniería Geológica Computarizada, S.A. de C.V.
- Juamapa (2009). *Resultados. Acciones PATME 2006-2009*. Celaya, México: Junta de Alcantarillado y Agua Potable de Celaya.
- Lesser y Asociados, S.A. de C.V. (1995). *Estudio hidrogeológico y modelo matemático, acuíferos los Apaseos*. Guanajuato, México: Lesser y Asociados, S.A. de C.V.
- Ogrosky, H. O., & Mockus, V. (1964). *Hidrology of agriculture lands. Handbook of applied hidrology*. New York: McGraw-Hill.
- SARH (1980). *Servicios de prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona del valle de Celaya, en el estado de Guanajuato*. México, DF: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Torres, V. J. (2011). *Sistema Poka-Yoke. Programación Matemática y Software*, 3(1), 12.

Dirección institucional de los autores

M.C. J. Hilario Romero
Dr. Oscar L. Palacios
Dr. Bernardo S. Escobar

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Km 36.5 carretera México-Texcoco
56230 Montecillo, Estado de México, México
Teléfono: +52 (595) 9520 200, ext. 1173
hromer03@gmail.com
opalacio@colpos.mx
esamuel@colpos.mx