



Explotación y renovabilidad del agua subterránea en una cuenca semiárida del Altiplano Mexicano

IGNACIO NAVARRO DE LEÓN*



En el centro y norte del país, la principal y en ocasiones la única fuente de abastecimiento para satisfacer todas las demandas es el agua subterránea. En los últimos años la demanda del agua se ha incrementado, lo que ha provocado una sobreexplotación de los mantos acuíferos con la consecuente generación de problemas ambientales, económicos y sociales.¹ Los principales problemas ambientales derivados incluyen el deterioro de los ecosistemas, agotamiento de manantiales, descenso del nivel del agua subterránea, reducción de los caudales base de los ríos, subsidencia y agrietamientos del terreno, deterioro de la calidad fisicoquímica del agua subterránea y salinización de suelos. El impacto social de esta problemática ha sido una mayor marginación y migración hacia Estados Unidos o hacia los grandes centros

urbanos del país; la competencia por el recurso ha hecho surgir conflictos entre usuarios, distritos de riego e incluso entre entidades federativas.

Históricamente, Guanajuato se ha considerado como uno de los estados de mayor producción agrícola y, por consecuencia, es uno de los primeros en resentir los efectos de esta problemática. Guanajuato es el estado que encabeza la lista con el mayor número de acuíferos sobreexplotados (13). La Cuenca de la Independencia (CI) se ubica en la región más árida de Guanajuato, y la actividad económica más importante es la agricultura. El número de perforaciones ha aumentado en forma exponencial y actualmente existen más de 2,400.² Por tal motivo, la CI resulta una región ideal para la investigación de la problemática de la sobreexplotación del agua subterránea, pues se trata de una cuenca representativa de muchas regiones del país, incluyendo aspectos como clima, crecimiento demográfico y desarrollo agrícola e industrial.

Para mejorar la comprensión de los mecanismos y fenómenos involucrados en la compleja problemática de la sobreexplotación, se requiere de la

□ El presente artículo está basado en la investigación "Análisis de estrategias de manejo integral del agua subterránea mediante modelación de flujo: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México", galardonada con el Premio de Investigación UANL 2006 en la categoría de Ciencias de la Tierra y Agropecuarias, otorgado en sesión solemne del Consejo Universitario de la UANL, en septiembre de 2006.

* Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL; Exhacienda de Guadalupe, Carr. Linares-Cerro Prieto km 8; Linares, N.L., México, 67700. e-mail: inavarro23@fct.uanl.mx

aplicación de los modelos numéricos de flujo. Actualmente, los modelos numéricos han demostrado ser las herramientas analíticas más sofisticadas para reproducir e investigar el comportamiento de los sistemas naturales y sus perturbaciones.⁵ Por consiguiente, para los propósitos del presente trabajo se emplea un modelo numérico calibrado de flujo subterráneo, en régimen estacionario y transitorio y en combinación con otras metodologías, con el fin de: *a)* analizar la explotación histórica del agua subterránea, *b)* comprender el comportamiento de los componentes del balance hidrogeológico durante el proceso de explotación; *c)* evaluar la renovabilidad del recurso hidráulico.

Área de estudio

La CI se localiza en la porción septentrional de Guanajuato, México (figura 1). Está comprendida entre los meridianos 100°12' y 101°36' de longitud oeste y los paralelos 20°42' y 21°36' de latitud Norte. La extensión superficial de la cuenca es de 6,840 km² y abarca principalmente los municipios de San Felipe, San Diego de la Unión, Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende, San Luis de la Paz, Doctor Mora y San José Iturbide; y parcialmente los municipios de Ocampo, León y Guanajuato. La población total residente dentro de la CI se estimaba en alrededor de 463,000 habitantes en 2000.²

En el área predominan tres tipos de clima con variaciones en la temperatura y la precipitación invernal. Las diferenciaciones climáticas son causadas por masas de aire húmedo provenientes del Océano Pacífico y la orografía del área. En el S y SW prevalece un clima cálido; en el SE existe un clima semihúmedo y en las partes más bajas de la cuenca y hacia el N y NE se presenta un clima seco. La precipitación media es de 576 mm/año.³ Adicionalmente, la temperatura media anual es de 16°C (rango = 9-25 °C), con una evaporación potencial media de 1,828 mm/año.

Geológicamente, la CI se ubica en la intersección de tres provincias geológicas: la Sierra Madre Occidental (SMOc), la Sierra Madre Oriental (SMOr) y el Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM).⁴ Las rocas más antiguas en el área son de origen volcánico, plutónico y vulcano sedimentario



Fig. 1. Localización de la CI, Guanajuato, México.

de edades del Jurásico tardío y Cretácico temprano. En el Cretácico tardío se depositaron gruesas secuencias de calizas, areniscas y margas (SMOr). Las secuencias se encuentran expuestas en el oriente (Sierra de Mineral de Pozos) y en el sureste de la cuenca (Sierra de Los Cuarzos). Durante el Cretácico tardío y el Terciario temprano (Mioceno medio) tuvo lugar un voluminoso vulcanismo de composición intermedia a silícica (SMOc) en el norte y occidente de la CI (Sierra del Cubo y Sierra de Guanajuato). Sin embargo, el Terciario tardío se caracteriza por importantes volúmenes de rocas andesíticas, riolíticas y basálticas (CVTM). La evolución de la cuenca y la descripción geológica detallada es presentada por Alanís-Ruiz.⁵

La hidrogeología consiste de tres unidades hidroestratigráficas: *a)* una unidad basal de baja permeabilidad que funciona como un acuífudo, compuesta de rocas sedimentarias, vulcanosedimentarias y plutónicas del Jurásico tardío y Cretácico temprano; *b)* un acuífero fracturado constituido por secuencias sedimentarias marinas del Cretácico tardío y todos los emplazamientos volcánicos posteriores; *c)* un acuífero granular compuesto por sedimentos clásticos que rellenaron las depresiones tectónicas y formaron una vasta planicie. El valor de conductividad hidráulica media para ambos acuíferos es de 2.01 y 4.21 m/d, respectivamente. La recarga del agua subterránea calculada para 1991 mediante balance hidrológico es de 171 Mm³/año.⁶

Metodología

La metodología aplicada consistió de cuatro etapas:

1. Desarrollo de un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico, de acuerdo con la metodología propuesta por Tóth,⁷ a partir de:

- a) La compilación, generación y análisis de la información básica e histórica.
- b) El análisis de los datos históricos y la búsqueda de evidencias acerca de aspectos específicos relacionados con los sitios de las manifestaciones.
- c) Trabajo de campo para elaborar un inventario de las manifestaciones de descarga de agua subterránea.

2. Simulación del régimen de flujo subterráneo bajo condiciones naturales mediante un modelo numérico de flujo en estado estacionario. Se aplicó un modelo numérico tridimensional, basado en diferencias finitas para resolver las ecuaciones de flujo subterráneo, bajo condiciones isotérmicas en un medio anisotrópico (MODFLOW-2000).⁸

3. Análisis de la evolución histórica de la explotación del agua subterránea y sus efectos.

4. Calibración del modelo numérico de flujo en estado estacionario mediante el trazado inverso de partículas conservativas.

Resultados y discusión

Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico

El desarrollo alcanzado en las últimas cuatro décadas sobre el conocimiento del flujo del agua subterránea en cuencas sedimentarias permitió determinar que, bajo la influencia de la fuerza de gravedad, el agua se mueve a través del medio geológico siguiendo patrones espacialmente definidos, con capacidad para desarrollar procesos fisicoquímicos en diferentes escalas de tiempo.¹² Durante tales procesos, se moviliza, transporta y acumula materia y energía, que en la superficie pueden generar una gran cantidad de efectos y manifestaciones. Se reconocen tres tipos de sistemas de flujo: local, cuando sus áreas de recarga y descarga se encuentran

contiguas; intermedio, cuando existen uno o más altos topográficos entre sus áreas de recarga-descarga; regional, cuando su área de recarga se localiza en los parteaguas de la cuenca y descarga en la parte más baja de la misma. La determinación del dominio de los sistemas de flujo mediante manifestaciones es fundamental para conocer y describir el régimen hidrogeológico y establecer el modelo conceptual de su funcionamiento. Para el caso particular de la CI se recurrió a un conjunto de disciplinas y métodos tan diversos como: geología, geología estructural, hidrogeología, geomorfología, edafología, fotogeología, percepción remota, biología, paleohidrología, paleoclimatología, paleontología, arqueología e historia como fuentes de información que permitieran reconstruir las condiciones del régimen hidrogeológico antes de la explotación intensiva del agua subterránea.⁹

Las manifestaciones asociadas a las descargas de agua subterránea son manantiales, lagunas, ciénegas, suelos salitrosos, depósitos de calcedonia, artesianismo, termalismo y presencia de freatofitas. Las evidencias sobre las condiciones son de tipo paleoecológico, paleontológico, antropológico e histórico. El tipo de manifestaciones y su posición dentro de la cuenca permitió sugerir la existencia de tres zonas concéntricas con características que corresponden con tres de los patrones o sistemas de flujo: zona I, cercana al parteaguas y con manantiales fríos, de caudales variables durante el año, controlada por sistemas de flujo local. La presencia de lagunas, ciénegas y suelos salitrosos en la zona II sugiere un aporte constante de agua subterránea procedente de flujo intermedio más profundo. Finalmente, los manantiales termales, el artesianismo y el depósito de sales y calcedonia en la zona III son producto de las descargas del sistema de flujo regional más profundo, con agua de mayor temperatura y carga de minerales. En la zona II es probable la participación de flujo local, de la misma manera que en la zona III participarían flujos locales e intermedios, dependiendo de la geometría del sistema. En la figura 2 se muestra el modelo conceptual propuesto con el dominio de los sistemas de flujo. Los detalles para la generación del modelo conceptual se presentan en Navarro de León *et al.*⁹

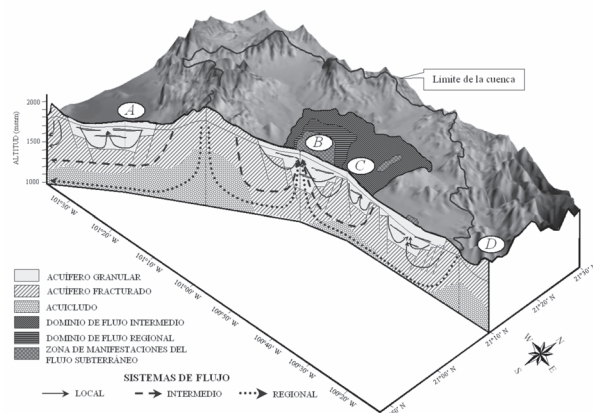


Fig. 2. Modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico en la CI y zonas aledañas.

Evolución histórica de la explotación del agua subterránea

Los primeros aprovechamientos o captaciones de las descargas naturales del agua subterránea (manantiales y ciénegas) se remontan al siglo II a.C., de acuerdo a evidencias antropológicas.⁹ Sin embargo, los primeros aprovechamientos de agua subterránea, *in sensu stricto*, iniciaron en el siglo XVII con la fundación de las haciendas y la perforación los primeros pozos. El número de aprovechamientos creció muy poco hasta principios de la década de los cincuenta, cuando se estima que existían ~250 aprovechamientos entre los que se contaban alrededor de 150 pozos profundos.¹⁰ En 1970, el primer censo de aprovechamientos determinó que existían 918 aprovechamientos de agua subterránea. En 1981 se realizó una actualización al censo anterior y se determinó un total de 1,469 aprovechamientos.¹¹

Censos realizados en 1987 y 1992 contabilizaron 1,558 y 1,785 aprovechamientos, respectivamente.¹² En 1996 se censaron 1,411 captaciones de agua subterránea.¹³ La porción occidental de la cuenca fue censada en 1999, se determinaron un total de 949 captaciones, de las cuales 74 estaban fuera de operación.¹⁴ En 2000 se reportaron 53 nuevos aprovechamientos con lo que se estima que el número total de aprovechamientos para este año era de 2,413 en toda la cuenca.¹⁵

A partir de la información existente se reconstruyó la historia de extracción (tabla I). Para la cuenca en general, y de acuerdo con estas tendencias, es evidente que los volúmenes medios anuales de extracción sobrepasaron, a partir de 1983, el volumen de la recarga neta, esto significa que ya desde antes el balance de agua era nocivo y las extracciones han generado cambios negativos importantes

Tabla I. Volumen histórico de la extracción anual de agua subterránea en la CI.

AÑO	Número de aprovechamientos activos	Volumen Total (Mm ³ /año)	Fuente
1950	~250*	~45*	Este trabajo
1970	~844**	165.63	(SRH, 1970)
1981	1,320	412.56	(SRH, 1981)
1987	1,409	449.72	(CNA, 1992)
1992	1,636	542.29	(CNA, 1992)
2000	1,995	759.65	Este trabajo

* Estimados a partir de las tendencias de perforación.

** Considerando que el 92 % de los aprovechamientos reportados se encontraban activos.

en el volumen de almacenamiento de los acuíferos.

Modelación numérica

El código numérico elegido para la solución de los sistemas de ecuaciones de flujo fue MODFLOW-2000, desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos.⁸ El modelo fue discretizado horizontalmente en una malla de 350 x 225 celdas cuadradas, cuyas dimensiones por celda son de 400 m por lado. La discretización vertical es de seis capas con espesor variable. Como condiciones de frontera se asignaron: la recarga; la evapotranspiración potencial calculada con el método de Turc; el río y los cuerpos de agua superficial. El criterio utilizado para establecer el mejor ajuste fue el residual promedio, éste es el promedio de las diferencias entre los valores observados y los valores calculados de carga hidráulica en las celdas activas superiores.

El modelo numérico indica que las velocidades del flujo son mayores en los extremos del sistema, es decir, en las zonas de recarga y descarga, en concordancia con la teoría del flujo regional.⁷ Los sistemas de flujo subterráneo son entidades dinámicas que operan en diversas escalas de espacio y

tiempo, por lo que la determinación de sus velocidades mediante modelación numérica constituye una valiosa herramienta para la comprensión de su dinámica y plantea profundas implicaciones para la explotación y manejo del recurso hídrico.

Para el caso particular del problema analizado, la discretización temporal fue establecida en 50 años, que corresponde con la explotación histórica del agua subterránea en la cuenca (1950-2000). La ecuación de balance para el modelo transitorio puede ser escrita como:

$$R_d + R_l + R_r + S_{in} = D_l + D_r + ET + B + S_{out} = 0$$

donde R_d es la recarga directa; R_l la recarga lateral; R_r es la recarga a través del río; S_{in} es el almacenamiento; D_l la descarga subterránea lateral; D_r es la descarga hacia el río; ET es la evapotranspiración; B la extracción por bombeo, y S_{out} es el almacenamiento.

Por lo que el balance (en Mm^3) es:

Para 1970: $330.21 + 62.01 + 49.96 + 0.45 - 130.09 - 94.37 - 13.40 - 197.02 - 7.56 = 0.19$
 Para 1981: $338.27 + 63.13 + 60.52 + 203.31 - 129.52 - 41.17 - 10.89 - 483.06 - 0.52 = 0.07$
 Para 1992: $348.16 + 64.66 + 81.33 + 263.89 - 128.97 - 10.42 - 9.06 - 609.56 - 0.24 = -0.21$
 Para 2000: $341.33 + 65.31 + 114.04 + 413.35 - 127.91 - 0.86 - 7.01 - 796.73 - 1.62 = -0.10$

El acelerado ritmo del bombeo ha provocado que, desde 1970, las extracciones se hagan con cargo al volumen de almacenamiento en ambos acuíferos; como es evidente en la forma de las curvas de ambos parámetros que describen un patrón de comportamiento casi simétrico. El volumen recargado ha resultado insuficiente para satisfacer las extracciones, ya que, de acuerdo con la gráfica, las extracciones en 1978 sobrepasaron los $430 Mm^3$ anuales. Bajo esta situación, para compensar los déficits cada vez se ha tenido que recurrir a tomar mayores volúmenes del almacenamiento de los acuíferos. En 1996 los volúmenes extraídos o tomados del almacenamiento sobrepasaron la recar-

ga directa, y para 2000 fueron casi equivalentes al volumen total que ingresaba en la cuenca en 1950.

Dinámica y renovabilidad del agua subterránea

Para evaluar el tiempo de tránsito del agua en la cuenca se procedió al trazado inverso de partículas con el módulo MODPATH.¹⁶ Esta técnica consiste en estimar las trayectorias y velocidad del flujo; el trazado directo de partículas permite conocer las direcciones hacia las cuales el agua se moverá y, en este caso, el tiempo estimado para descargar; el trazado inverso indica la trayectoria desde un proba-

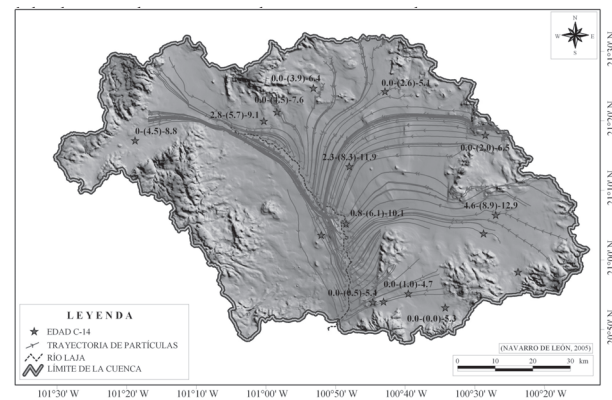


Fig. 3. Trayectorias de partículas conservativas obtenidas mediante trazado inverso. Los indicadores sobre las líneas de trazado corresponden a 1,000 años de tránsito. Se muestran también la ubicación de las muestras datadas radiométricamente con ^{14}C reportadas por Mahlknecht *et al.*¹⁷ Los mínimos y máximos recalculados con PHREEQC corresponden a los extremos en la notación, el número entre paréntesis es el valor calculado con NETPATH. Los valores están expresados en miles de años antes del presente.

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos mediante el trazado inverso de partículas conservativas colocadas en el acuífero granular, muy cerca de la superficie a lo largo del Río Laja y en la zona de descarga del agua subterránea. Estas partículas inician su recorrido en el acuífero granular, al aumentar su distancia a las zonas de descarga (en dirección opuesta al flujo) transitan en forma casi horizontal en el acuífero fracturado y regresan nuevamente al acuífero granular cerca de las zonas de recarga ($100^{\circ}18'W/21^{\circ}03'N$). El modelo calcu-

la un tiempo de tránsito promedio aproximado de 12,000 años desde esta zona. El tiempo estimado de tránsito desde el valle de San Luis de la Paz (100°30'W/21°18'N) hasta la región de descarga es cercano a los 5,000 años; el agua recargada en el borde norte de la cuenca tarda 7,000 años en alcanzar la zona de descarga en el centro. Un tiempo similar es obtenido para la región de San Felipe (101°15'W/21°25'N). El agua subterránea en la parte central del valle de Laguna Seca (100°38'W/21°10'N) tardaría 1,000 años, en promedio, para llegar a descargar a través de un sistema de flujo intermedio.

Por otro lado, Mählknecht *et al.*^{17,18} reportan edades radiométricas obtenidas con ¹⁴C en 16 muestras de agua subterránea, cuyas ubicaciones también son mostradas en la figura 3. La información obtenida mediante métodos independientes de los tiempos promedios de tránsito del agua subterránea en la cuenca es coincidente y de gran importancia en términos de su manejo a mediano y largo plazo. La dinámica de los sistemas de flujo indica que el tiempo promedio de renovabilidad completa para el agua subterránea en la CI es de aproximadamente 6,000 años, lo que convierte al agua en un recurso vulnerable a su agotamiento, con una renovabilidad muy limitada bajo las condiciones semiáridas de la región. Adicionalmente, los tiempos de tránsito promedio y las edades radiométricas en la CI son compatibles con los determinados en la cuenca de Villa de Reyes, San Luis Potosí.¹⁹ Los tiempos de tránsito o residencia en el acuífero para agua profunda oscilan en el rango de 3,600 a 16,000 años antes del presente. Esta cuenca terciaria limita al norte de la CI y ambas poseen origen y evolución geológica muy similar.

Conclusiones

No obstante la gran diversidad de mecanismos involucrados en el fenómeno de la sobreexplotación, la CI reúne los elementos principales para considerarla como un sistema hidrogeológico sobreexplotado. Esto es el resultado, por un lado de una reducida disponibilidad del agua subterránea determinada por las condiciones climatológicas semiáridas, los bajos volúmenes de la recarga y una

limitada renovabilidad del recurso hidráulico; y por el otro, de la intensiva extracción llevada a cabo durante las últimas décadas. El tiempo de renovabilidad natural del sistema hidrogeológico habla a favor de un recurso hidráulico con características fósiles, no renovable en términos de la escala humana y altamente vulnerable a su agotamiento en las condiciones actuales de explotación.

Los resultados del modelo de flujo calibrado en estado transitorio confirman la naturaleza compleja y multidireccional de los sistemas hidrogeológicos. En consecuencia, el criterio tradicionalmente empleado para definir la disponibilidad o la explotación del agua subterránea con base en el volumen de la recarga carece de sustento. Considerando, además, que los efectos negativos de la explotación se manifiestan mucho antes de alcanzar los volúmenes anuales de la recarga. Se precisa, por lo tanto, de una profunda revisión de este criterio.

Resumen

Se presentan diversos aspectos relacionados con la explotación y manejo del agua subterránea en una cuenca semiárida. Se aplica un modelo numérico tridimensional de flujo para analizar el régimen de las aguas subterráneas y evaluar los efectos de su explotación. El tiempo promedio de tránsito del agua en los acuíferos es de ~6,000 años, por lo que se considera un recurso no renovable en términos de la escala humana. La recarga es reducida y durante los últimos 50 años se ha explotado gran parte del agua que fue recargada y almacenada durante miles de años. Las condiciones climatológicas semiáridas, la limitada renovabilidad el recurso hidráulico y las bajas tasas de recarga hacen de la CI un sistema altamente vulnerable.

Palabras clave: Sobreexplotación, Sustentabilidad, Flujo regional de agua subterránea, Cuenca semiárida, Modelación.

Abstract

Diverse aspects related to the exploitation and groundwater management in an overexploited semi-

arid basin are presented. A 3D modeling approach is used to analyze the groundwater regime and to evaluate the effects of overexploitation. The mean transit time of water in the aquifers is about 6,000 years. For this reason, it can be regarded as a non-renewable resource in human scale terms. The recharge rate is low and during the last 50 years, the intensive extraction has been done mainly from water recharged and stored during thousands of years. The semi-arid climatologic conditions, the limited ability to renew the hydraulic resource, and the low recharge rates make the CI a highly vulnerable system.

Keywords: Overexploitation, Sustainability, Regional groundwater flow, Semi-arid basin, Modeling.

Agradecimientos

El autor agradece a la UANL el apoyo económico otorgado a través del Programa de Mejoramiento del Profesorado (Promep). Se agradece al Dr. Jaime Max Garfias Soliz (CIRA-UAEMEX), por su guía y apoyo como tutor doctoral. Se extiende también el reconocimiento a la Comisión Nacional del Agua (CNA), Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), Consejo de Desarrollo Regional del Noroeste de Guanajuato (Codereg) y al Centro de Información de la Cuenca Lerma-Chapala por haber brindado la información necesaria.

Referencias

1. CNA (Comisión Nacional del Agua). (2005). Estadísticas del agua en México. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Programación, México, D.F. 105 p.
2. CEASG (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato). (1999). Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del río Laja - San Felipe. Documentos del Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato. Estudio realizado por Ingeniería Geológica Computarizada S. A. de C. V., bajo el contrato n. CEASG-APA-GTO-98-002, Guanajuato, Gto., México, 141 p.
3. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). (1998). Elementos del clima en el estado de Guanajuato. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Norte de Guanajuato, Publicación especial n. 1, 155 p.
4. Aranda-Gómez J.J., Henry C.D. y Luhr J.F. (2000). Evolución tectonomagmática pos-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y de la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. LIII, pp. 59-71.
5. Alanís-Ruiz E. (2002). Evolución geológica de la CI y sus alrededores, estado de Guanajuato, México. Tesis profesional, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 88 p.
6. Mahlkecht J., Schneider J.F., Merkel B.J., Navarro de León I., Bernasconi S.M. (2004). Groundwater recharge and geochemical evolution in a semiarid sedimentary basin in Central México: Implications for the applicability of Mass Chloride Balance method. *Hydrogeology Journal*, v. 12, n. 5, pp. 511-530.
7. Tóth J. (1999). Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*, v. 7, n. 1, pp. 1-14.
8. Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C., McDonald M.G. (2000). MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey modular groundwater model - User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. United States Geological Survey, Open-File Report 00-92, Reston, VA, USA, 121 p.
9. Navarro de León I., Garfias-Soliz J., Mahlkecht J. (2005). Groundwater flow regime under natural conditions as inferred from past evidence and contemporary field observations in a semi-arid basin: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México. *Journal of Arid Environments*, v. 63, p. 756-771.
10. SRH (Secretaría de Recursos Hidráulicos). (1970). Estudio geohidrológico de la cuenca grande del río Laja, Guanajuato. Realizado por la empresa Hidrotec S.A. para la Dirección

- General de Estudios de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, bajo el contrato EI-71-35, clave no. AS-95, México, D.F., 213 p.
11. SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). (1981). Actualización del estudio geohidrológico de la Cuenca Alta del río La Laja, Guanajuato. Estudio realizado por la empresa Geohidrológica Mexicana S.A. para la Dirección General de Aprovechamientos Hidráulicos de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D.F. 178 p.
 12. CNA (Comisión Nacional del Agua) (1992). Diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y de las alternativas de operación del acuífero de la Cuenca Alta del río Laja, estado de Guanajuato. Estudio realizado por Consultores en Geología, S.A. de C.V. bajo el contrato n. CNA-GRLB-034/92 para la Gerencia Regional Lerma-Balsas de la Comisión Nacional del Agua, México, D.F. 108 p. + anexos.
 13. CNA (Comisión Nacional del Agua) (1996). Actualización del estudio geohidrológico de la cuenca de Laguna Seca, Guanajuato. Informe técnico realizado por la empresa Proyectos Antares S.A. de C.V. bajo el contrato GAS-011-96 para la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua, México, D.F., 201 p.
 14. CEASG (Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato) (1999). Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Río Laja-San Felipe. Documentos del Plan Estatal Hidráulico de Guanajuato. Estudio realizado por Ingeniería Geológica Computarizada S.A. de C.V. bajo el contrato n. CEASG-APA-GTO-98-002, Guanajuato, Gto., México, 141 p.
 15. UNAM-CODER (Universidad Nacional Autónoma de México-Consejo para el Desarrollo Regional de Guanajuato). (2000). Proyecto para el manejo sustentable del agua subterránea en la Cuenca de la Independencia, municipios de San José Iturbide, Dr. Mora, San Luis de la Paz, San Diego de la Unión, San Felipe, Dolores Hidalgo y San Miguel de Allende, Guanajuato. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 107 p.
 16. Pollock D.W. (1994). User's guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, version 3: a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water model. United States Geological Survey, Reston, VA, USA, Open-File Report 94-464, 234 p.
 17. Mahlknecht J., Steinich B., Navarro de León I. (2004b). Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models. *Environmental Geology*, v. 45, n. 6, p. 781-795.
 18. Mahlknecht J., Garfias Solís J., Aravena R., Tesch R. (2006). Geochemical and isotopic investigations on groundwater residence time and flow in the Independence Basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, v. 324, n. 1-4, p. 283-300.
 19. Carrillo-Rivera J.J., Clark I.D., Fritz P. (1992). Investigating recharge of shallow and paleogroundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes. *Applied Hydrogeology*, v. 4, p. 35-48.

Recibido: 7 de septiembre de 2006

Aceptado: 15 de septiembre de 2006