

IV SEMINARIO-TALLER. PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN: *PROTECCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA*

● Lima, Perú, Abril 2004

■ ALTERNATIVAS DE GESTIÓN SUSTENTABLE DE RECURSOS HÍDRICOS EN UN ACUÍFERO SOMETIDO A SOBREEXPLOTACIÓN, CUENCA DE LA INDEPENDENCIA, GUANAJUATO, MÉXICO

● Por: Garfias J.⁽¹⁾
Navarro de Leon, I.⁽²⁾
Mahlknecht J.⁽³⁾
Llanos H.⁽⁴⁾

(1) Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México.

(2) Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.

(3) Facultad de Ingeniería en Geomática e Hidráulica, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México

(4) Dpto. de Geodinámica, Universidad del País Vasco. Vitoria-Gasteiz.

(México)



● **RESUMEN**

● El agua subterránea constituye la principal fuente de agua potable en el estado de Guanajuato, y por consecuencia es uno de los que primeramente ha resentido los efectos de la sobreexplotación, uno de los cuales es el objetivo del presente estudio. En particular esta investigación centra su atención en la Cuenca de la Independencia (CI), la cual cubre una extensión de 6,840 Km², donde se observan descensos en el nivel piezométrico que van de 2 a 5 m/año. De particular interés del presente estudio es proponer un esquema de manejo del agua subterránea en la CI. La investigación involucra en primera instancia el análisis de la información histórica.

- En segundo término, el desarrollo de un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico, con base en evidencias de campo bajo el concepto de flujo regional del agua subterránea. Finalmente, la aplicación de un modelo numérico que reproduzca las condiciones estacionarias y transitorias, posibilitando reproducir los descensos del nivel del agua subterránea por efecto del bombeo y permita conocer la disponibilidad del agua subterránea.
- 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 determinados en la CI son compatibles con los obtenidos por el método de 14C en la cuenca de Villa de Reyes, San Luis Potosí.
- En general, la correspondencia de las zonas de recarga y descarga con las manifestaciones descritas en el modelo conceptual, confirma que el modelo de flujo es capaz de reproducir las condiciones del régimen hidrogeológico natural, con sus patrones de flujo subterráneo.

● PALABRAS CLAVE

■ Sobreexplotación, sustentabilidad, acuífero, modelación, flujo regional, México

● INTRODUCCIÓN

- La amenaza de una escasez de agua dulce es un riesgo muy serio. Por un lado, los recursos no son infinitos, sino por el contrario son frágiles y limitados. Por otro, el consumo a escala planetaria es siete veces superior al de principios de siglo, mientras que la población mundial sólo se ha triplicado, por consiguiente, el aumento de la demanda va unido al mejoramiento del estilo de vida determinado por el desarrollo socioeconómico.
- Es una evolución inquietante ya que, como es de esperarse, el aumento del nivel general de vida debería persistir. Este recurso colectivo escasea por la explotación excesiva a que lo somete una humanidad numerosa, consumista y contaminante. Las señales de alarma son diversas: agotamiento de los mantos

freáticas, desecamiento de lagos y ríos, contaminación creciente, desertificación en aumento. Esta escasez tiene un alto costo humano que se agrava: desnutrición, enfermedades sanitarias, éxodo rural y sobrepoblación urbana.

- En vista de ello, el desarrollo sustentable (duradero) y el uso de los recursos de aguas subterráneas debe tener lugar en el amplio contexto de la gestión integrada de los recursos de agua. Esto significa que “la cantidad de agua subterránea que se puede extraer legalmente de una cuenca hidrológica a largo plazo no debe causar consecuencias severas de índole económica, social, ecológica e hidrológica”. No obstante, lo anterior constituye una definición rígida del uso sustentable y es posible que existan circunstancias que justifiquen el bombeo excesivo de un acuífero. No es posible asegurar que, en todos los casos, el agua que entra al acuífero deba ser igual a la cantidad que se extrae.

- En diferentes regiones del mundo se han documentado casos dramáticos de sobreexplotación del agua subterránea similares al mostrado en el presente estudio (Sophocleous, 2000). En particular, esta investigación centra su atención en la Cuenca de la Independencia, la cual cubre una extensión de 6,840 km² y se localiza en la porción nororiental del estado de Guanajuato. La investigación involucra tres componentes principales.

- Primero, el análisis de la información histórica (que aporta un contexto de soporte para el estudio y valiosos datos físicos de la situación hidrogeológica regional), para lo cual fueron recopilados y revisados reportes de instancias gubernamentales y consultores.

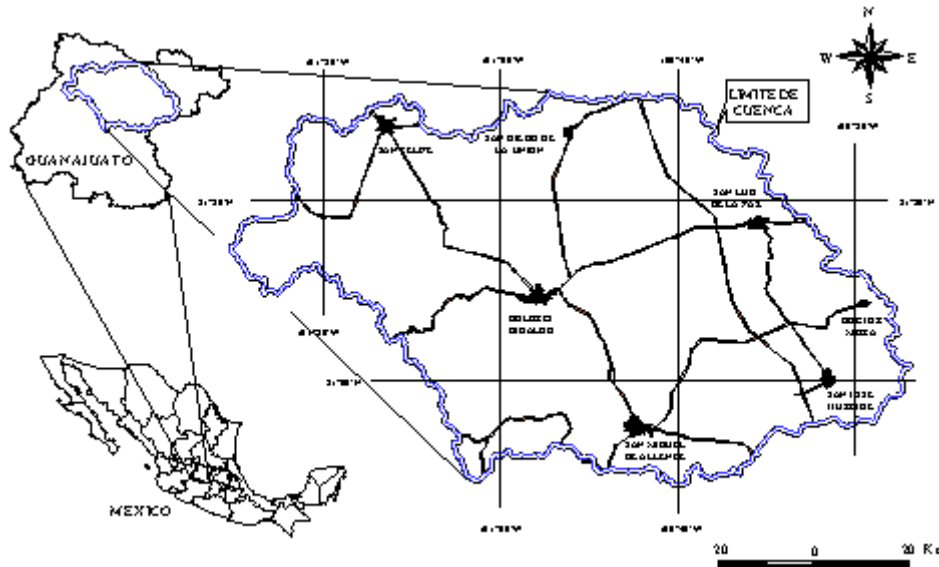
- En segundo término, el desarrollo de un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico, con base en evidencias de campo bajo el concepto de flujo regional del agua subterránea.

- Finalmente, la aplicación de un modelo numérico que reproduce las condiciones estacionarias y transitorias, los descensos del nivel freático por efecto del bombeo y permite conocer la disponibilidad del agua subterránea.

● DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

- Guanajuato es el estado de la República Mexicana que encabeza la lista con el mayor número de acuíferos sobreexplotados, entre los que destaca el acuífero de la CI. La CI cubre una extensión de 6,840 Km² y se localiza en la porción nororiental del Estado de Guanajuato (Figura 1). El interior de la CI es una

planicie con una elevación que varía de 1,900 a 2,100 msnm, rodeada por montañas que alcanzan los 3,300 msnm. La CI pertenece al sistema hidrológico Lerma-Chapala y su límite nororiental forma parte de la divisoria continental con la cuenca del río Pánuco.

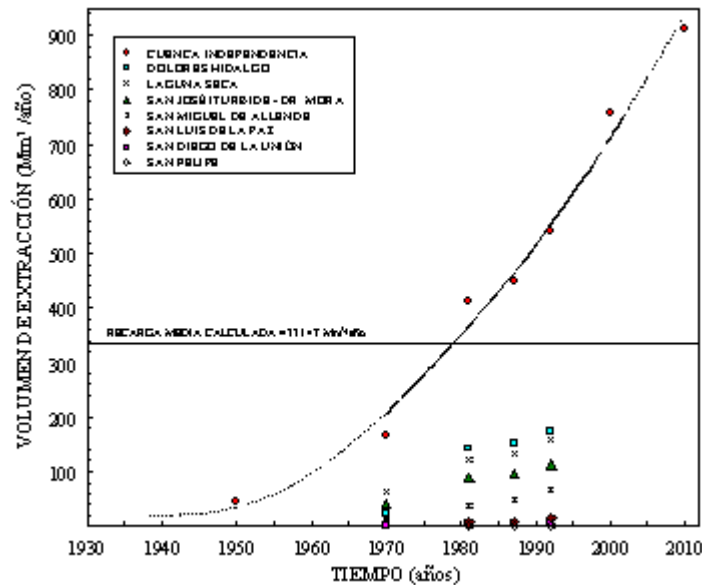


■ **Figura 1:** Localización de la Cuenca de la Independencia en el estado de Guanajuato.

- Es una cuenca con una altura mayor que los sistemas acuíferos vecinos (acuíferos de Villa de Reyes, León-Río Turbio, Guanajuato, Celaya y Querétaro), por lo que la recarga de la cuenca queda limitada prácticamente a lo que pueda captar de la precipitación directa sobre ella. El clima es semi-árido con una precipitación pluvial promedio anual de 600 mm en las montañas y de 400 mm en las partes bajas.
- Estas condiciones evitan que se formen corrientes superficiales permanentes importantes, en la época de lluvias el agua es captada mediante presas y bordos para su aprovechamiento en uso agrícola, pecuario y doméstico. Al igual que la mayor parte de la región, en la cuenca se observan dos unidades hidrogeológicas. Un acuífero fracturado consistente en todos los emplazamientos volcánicos afectados por esfuerzos extensivos y un acuífero granular, compuesto por los sedimentos que rellenaron la cuenca.

● **PROBLEMÁTICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DE LA INDEPENDENCIA (CI)**

- A partir de la información proporcionada por los estudios previos en la región se reconstruyó la historia de extracción del agua subterránea, dicha información es presentada en la figura 2. El déficit en el balance de agua subterránea no se ha dado de manera uniforme en la cuenca, la recarga es menor en el noreste y la mayor concentración de aprovechamientos ocurre en la porción oriental de la misma.



■ **Figura 2:** Volumen anualmente extraído durante los últimos 50 años en la CI. La tendencia observada durante el período de 1970 al 2000 está representada por la línea continua y la tendencia proyectada es mostrada con línea punteada.

- Como resultado de lo anterior, las primeras evidencias de este déficit se presentaron en la región de Laguna Seca en 1955 de acuerdo con el estudio de SRH (1970), extendiéndose posteriormente a otras regiones. Esto concuerda con la distribución de volúmenes extraídos y tendencias históricas por región ilustradas en la figura 2, donde las regiones de mayor explotación son: Laguna Seca, Dolores Hidalgo, San José Iturbide - Doctor Mora y San Miguel de Allende.

- A pesar de que no se hace una diferenciación explícita del uso de aprovechamientos en el estudio de SRH (1970), es evidente que el sector de mayor demanda es el agrícola (figura 2). En el año de 1981, el número de aprovechamientos activos dedicados al riego agrícola y actividades pecuarias era de 1,093; 12 pozos profundos abastecían a las industrias establecidas en la cuenca y 59 estaban destinados al uso doméstico.

- Para 1987 y 1992, las captaciones agrícolas se incrementaron a 1,158 y 1,333, respectivamente; las industriales pasaron a ser 14 y 16 en esos períodos; las de uso doméstico/público fueron 76 y 109; las de uso recreativo se incrementaron a 8 captaciones en ambos períodos (CNA, 1999). En el 2000, existía un total de 1,837 captaciones para uso agrícola y pecuario, 17 para uso industrial, 133 destinadas al abastecimiento doméstico y público y 8 de tipo recreativo.

- En general, el porcentaje promedio de captaciones para los períodos se distribuye de la siguiente manera: 92.08 % uso agrícola, 0.85 % uso industrial, 6.66 % uso doméstico/público y 0.40 % para uso recreativo. No obstante, se aprecia una ligera variación en el uso doméstico/público en el 2000 con respecto a 1981, el porcentaje para este rubro se ha incrementado de 4.77 % a 6.66 %, en respuesta al crecimiento poblacional y al aumento en el porcentaje de cobertura del servicio de agua potable. Desde la perforación de los primeros pozos a principios del siglo XX, su número ha venido incrementándose en forma exponencial y actualmente existen más de 2,400 pozos en operación. Este notable incremento en el número de pozos ha provocado descensos importantes en los niveles piezométricos que van de 2 a 5 m por año.

● METODOLOGÍA

- Considerando la importancia que reviste la extracción de agua subterránea en la CI como resultado de la sobreexplotación de los recursos hídricos, en primera instancia se procedió al análisis de la información histórica, para lo cual fueron recopilados y revisados reportes de instancias gubernamentales y consultores. En segundo lugar, se desarrolló un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeológico, con base en evidencias de campo bajo el concepto de flujo regional del agua subterránea (Tóth, 1999).

- Estas dos fuentes de información se utilizaron para cuantificar los parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y transmisividad para el acuífero granular y el fracturado. Finalmente, se utilizó un modelo de flujo que reproduce las condiciones iniciales del acuífero, con la distribución natural de las cargas hidráulicas.

- El modelo aplicado en estado estacionario asegura que los parámetros y la magnitud de la recarga sean consistentes. Posteriormente, la modelación de flujo en condiciones transitorias, permitió reproducir los descensos del nivel del agua subterránea por efecto del bombeo, conocer la disponibilidad del agua

subterránea y determinar los descensos piezométricos, considerando diferentes escenarios de explotación y manejo.

● **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

- La utilización de modelos matemáticos para estudiar el régimen de las aguas subterráneas constituye un modo eficaz de determinar la disponibilidad de los mismos con arreglo a distintas modalidades de utilización (Anderson y Woessner, 1992; El-Kadi, 1995; Bredehoeft, 2002). En tal sentido, el dominio del modelo comprende completamente la planicie y se extiende al pie de las montañas que la rodean, es decir, el acuífero granular y parte del acuífero fracturado. Verticalmente, el dominio ha sido establecido desde la superficie del terreno hasta una profundidad de 700 m con base en información geológica directa a partir de perforaciones.
- En general, la correspondencia de las zonas de recarga y descarga con las manifestaciones descritas en el modelo conceptual, confirman que el modelo numérico es capaz de reproducir las condiciones del régimen hidrogeológico natural con sus patrones de flujo subterráneo.
- La configuración de la carga hidráulica simulada por el modelo muestra un patrón de flujo similar a las direcciones del drenaje superficial. Los mayores gradientes hidráulicos se presentan al pie de las montañas, en los bordes del modelo, lo que en cierto modo explica la abundancia de descargas de aguas subterráneas (manantiales), al intersectar el nivel potenciométrico con el topográfico.
- Entre el valle central y Laguna Seca, en su porción septentrional, se presenta una pequeña divisoria de aguas subterráneas, que provoca gradientes hidráulicos inversos a la dirección general de flujo, esto confirma la existencia de sistemas de flujo local. La reducción del espesor del acuífero granular juega un papel determinante en el cambio de las direcciones de flujo, pues parte del sistema profundo (intermedio y regional) asciende y descarga en una zona que inicia en la región central y continua hasta la salida de la cuenca.

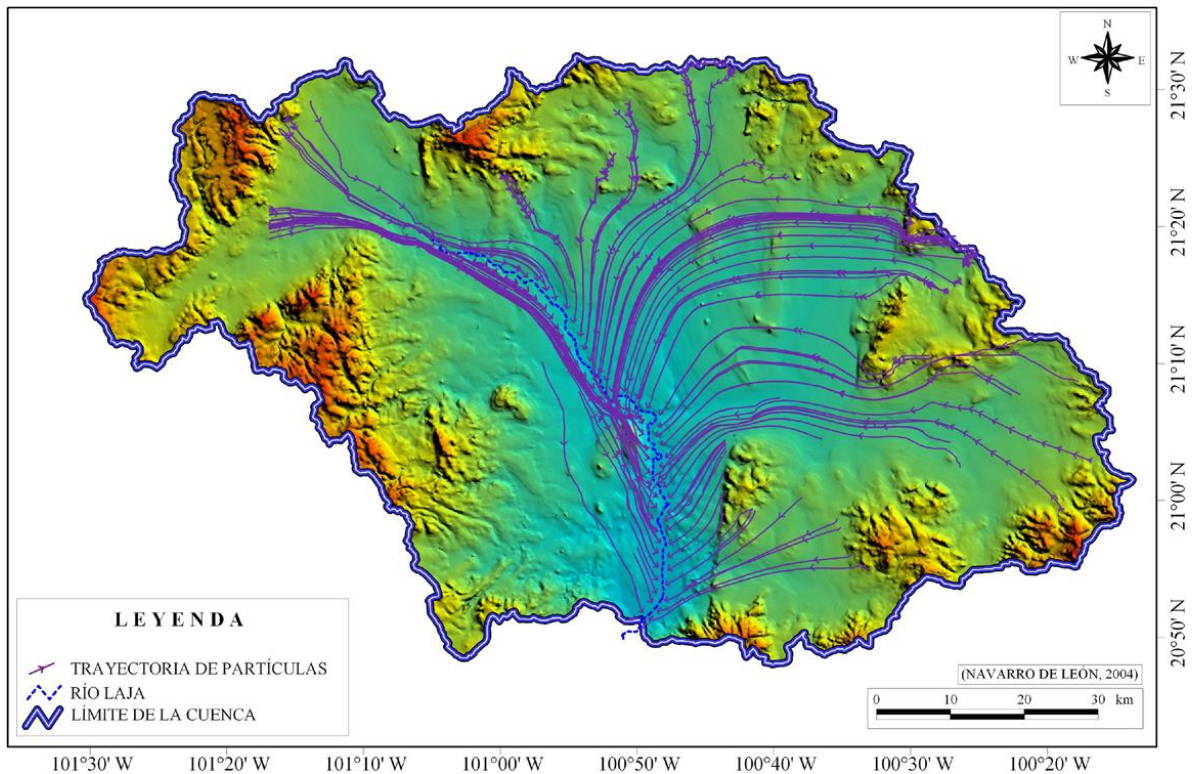


Figura 3: Trayectorias de partículas conservativas obtenidas mediante el trazado inverso. Los indicadores sobre las líneas de trazado corresponden a 1,000 años de tránsito.

- 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. 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 indican que los recorridos más largos del agua subterránea tardarían alrededor de 13,000 años.

- Los tiempos de residencia promedio obtenidos con el modelo de flujo concuerdan con las edades obtenidas con ¹⁴C por Mahlkecht (comunicación personal). Asimismo, las edades del agua subterránea en la CI son similares a las determinadas en la cuenca vecina de Villa de Reyes, San Luis Potosí donde los tiempos de residencia del agua en el acuífero profundo oscilan en el rango de 3,600 a 16,000 años (Carrillo-Rivera et al., 1992). Las mayores discrepancias entre los niveles calculados y observados comúnmente se presentan en los pozos de observación ubicados en el borde del acuífero granular, donde las

interferencias con el acuífero fracturado y las condiciones de frontera tienen mayor efecto.

- El análisis detallado de la evolución de la explotación y disponibilidad del recurso en condiciones transitorias, revela que los volúmenes extraídos se han hecho principalmente a expensas del almacenamiento de los acuíferos. Tomando en cuenta la complejidad del modelo, las dimensiones de la región de estudio, el intervalo de tiempo analizado y la cantidad de aprovechamientos simulados, los resultados se consideran aceptables para los propósitos del presente trabajo.

● CONCLUSIONES

- Como conclusión general cabe señalar que los resultados obtenidos mediante la utilización de un modelo de flujo para estudiar el régimen de las aguas subterráneas son, en cierto modo, satisfactorios y apoyan la validez de los métodos de análisis. De todo ello se puede concluir que las condiciones climáticas semiáridas, la limitada renovabilidad del recurso hidráulico y las bajas tasas de recarga hacen de la CI un sistema de frágil equilibrio.

- El equilibrio entre las aportaciones y las descargas de agua subterránea se mantuvo hasta la década de los 50's, cuando comenzaron a observarse los primeros abatimientos importantes en el valle de Laguna Seca. Esta situación ha ido mermando la capacidad de almacenamiento del acuífero, impulsando a que se adopten medidas apropiadas para garantizar la continuidad de los sistemas hidrológicos actuales y las actividades humanas que dependen de ellas.

- Con base en el conocimiento de las características hidrogeológicas e hidrodinámicas del acuífero, se espera que esta investigación sea un catalizador para la acción de personas y organizaciones que están en condiciones de contribuir a la solución de problemas vinculados al agua. Al mismo tiempo será preciso hacer hincapié en estrategias de gestión que provean recursos hídricos duraderos en la CI y cuencas aledañas, así como una distribución equitativa de esos recursos entre los habitantes.

● REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Anderson, M.P. y Woessner, W.W. (1992).** *Applied groundwater modeling*. 1st Edition, Academic Press, San Diego, CA, USA, 381 p.

- **Bredehoeft, J.D. (2002).** *The water budget myth revisited: Why hydrogeologist model.* Ground Water, v. 40, n. 4, p. 340-345.
- **Carrillo-Rivera, J.J., Clark, I.D. y Fritz, P. (1992).** *Investigating recharge of shallow and paleogroundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, México, with environmental isotopes.* Applied Hydrogeology, v. 4, p. 35-48.
- **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., México, D-F. 108 p. + anexos.
- **El-Kadi, A.L. (1995).** *Groundwater models for resources análisis and management.* 1st Edition, CRC Press Inc., Boca Ratón, FL, USA, 367 p.
- **Sophocleous, M. (2000).** *From safe yield to sustainable development of water resources: the Kansas nexperience.* Journal of Hydrology, Vol. 235:27-43.
- **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.
- **Tóth, J. (1999).** *Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations.* Hydrogeology Journal, v. 7, n. 1, p. 1-14.