

---

## AQUIFER POLLUTION RISK ASSESSMENT FOR A MULTI SOURCE PROCESS. THE SALAMANCA CASE 3

**RODRIGUEZ CASTILLO Ramiro<sup>1</sup>, ARMIENTA HERNANDEZ Aurora<sup>1</sup>,  
MEJÍA G. Juan Angel<sup>2</sup> and BERLÍN I. Joel<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Geofísica UNAM,

<sup>2</sup>COTAS Valle Santiago-Irapuato,

<sup>3</sup>Dir. Municipal Ecología, Salamanca Gto.

rrdz@tonatiuh.igeofcu.unam.mx

### ABSTRACT

Solutes coming from different pollution sources, natural and anthropogenic are affected the Salamanca aquifer system. As, Pb and benzene are some of the reported pollutants. An aquifer vulnerability assessment was done using the DRASTIC and AVI methods. A vulnerability zoning, a potential pollution sources cadastre and a population survey permitted a risk analysis. The most critical areas are related to a subsidence fault that is acting as a preferential channel for pollutants, particularly for hydrocarbon residuals.

**KEY WORDS:** hydrocarbon aquifer pollution, DRASTIC, AVI, Salamanca México

### RESUMEN

La calidad del agua subterránea del sistema acuífero de Salamanca Guanajuato, México esta siendo afectada por solutos provenientes de diferentes fuentes naturales y antropogénicas. Arsénico, plomo y benceno estan entre los contaminantes reportados. Se hizo una evaluación de vulnerabilidad mediante los métodos DRASTIC y AVI. La zonificación de vulnerabilidad, un catastro de fuentes potenciales de contaminación y los resultados de una encuesta permitieron efectuar una análisis de riesgo. Las áreas mas críticas estan relacionadas con una falla por subsidencia, la cual actúa como canal preferencial para los contaminantes, particularmente residuales de hidrocarburos.

**PALABRAS CLAVE:** contaminación acuifera. Hidrocarburos, DRASTIC, AVI, Salamanca México

## ANTECEDENTES

La presencia de olor, color y sabor a hidrocarburos en el agua abastecida es detectada desde 1992 por habitantes de la porción noreste de la ciudad de Salamanca Guanajuato, en el centro de México. La presencia de fase libre en un pozo de agua potable, 11, clausurado en 1998, se asocia a un derrame de hidrocarburos. La calidad del agua también se ha visto alterada por lixiviaciones de residuos de una empresa de agroquímicos, fugas de drenajes urbanos e industriales y lixiviaciones de rocas que contienen arsénico. Las concentraciones de arsénico y plomo rebasan los límites permisibles para agua potable en varios pozos (Berlín *et al*, 2001), lo cual llevó al cierre definitivo de los pozos 4 y 24. Aún persiste fase libre en algunas norias y piezómetros. Se han detectado metales, compuestos orgánicos (II, 2000) además de productos de transformación como cloroformo (Rodríguez *et al*, 2000).

El intenso régimen de extracción ha provocado asentamientos diferenciales del terreno, los cuales en la zona urbana han producido daños a la infraestructura. En 1982 se reporta la presencia de fracturas en casas habitación y se empieza a delinear una falla que cruza la porción nordeste de la ciudad.

Garduño y colaboradores (2001) no encontraron evidencias para soportar el origen tectónico de la falla. El desplazamiento acumulado es del orden de 60 cm en diez años. En piezómetros localizados a lo largo de la falla se ha venido detectado fase libre. Esto confirma una hipótesis inicial sobre el papel de la falla como canal preferencial para contaminantes y que permite la comunicación hidráulica entre componentes del sistema acuífero.

## EL SISTEMA ACUÍFERO

Salamanca es abastecida de agua por el sistema acuífero local. No existen fuentes alternas de agua. El Río Lerma, que cruza la zona urbana transporta aguas residuales urbanas e incluso industriales. El sistema acuífero esta constituido por una formación somera, libre, una intermedia, semiconfinada y una profunda, confinada. El nivel estático del acuífero somero se localiza a 18-19 m de profundidad. El del intermedio se encuentra a 35-45m. Tanto el acuífero libre como el semiconfinado están formados por material de grano fino a medio, arcillas, gravas y arenas (Mejía *et al*, 2001).

La falla principal permite que localmente, flujos del somero puedan incorporarse al acuífero actualmente en explotación. No hay suficientes evidencias que soporten la hipótesis de la comunicación hidráulica del somero o el intermedio con el profundo. La formación profunda es principalmente explotada por la Comisión Federal de Electricidad, CFE, para una termoelectrica, con pozos de 350m y 700m de profundidad. El agua presenta temperaturas cercanas a 50° C.

El Río Lerma, que cruza la mancha urbana, separa hidráulicamente a escala subterránea la parte Norte de la Sur (Fig 1). En la parte Norte se localiza la Refinería, la Termoeléctrica y la zona industrial. En el sur no se encuentra la formación somera y la profunda no está tan bien definida como en la parte Norte. El contenido de material arcilloso disminuye predominando rocas volcánicas. No se han encontrado manifestaciones de la falla bajo la margen inferior del Río.

### MAPEOS DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA.

La vulnerabilidad acuífera se define como la probabilidad de que un contaminante de una fuente superficial alcance el agua subterránea. Un acuífero vulnerable no necesariamente está contaminado, lo estará si es que se encuentra sobre el una fuente activa. No todos los componentes de un lixiviado alcanzarán a pasar la zona saturada. Son pocos los solutos no reactivos. Las arcillas presentan fenómenos de absorción, los cuales pueden frenar y retardar el paso de solutos. Por lo demás la baja conductividad de la arcilla dificulta la migración vertical en la zona vadosa. Un contaminante puede tardar periodos muy largos alcanzar el agua subterránea o no llegar nunca. Es por todos los argumentos anteriores que las cuantificaciones de vulnerabilidad no pueden ser absolutas. Una de las leyes de la vulnerabilidad dice que todas las aguas subterráneas son vulnerables.

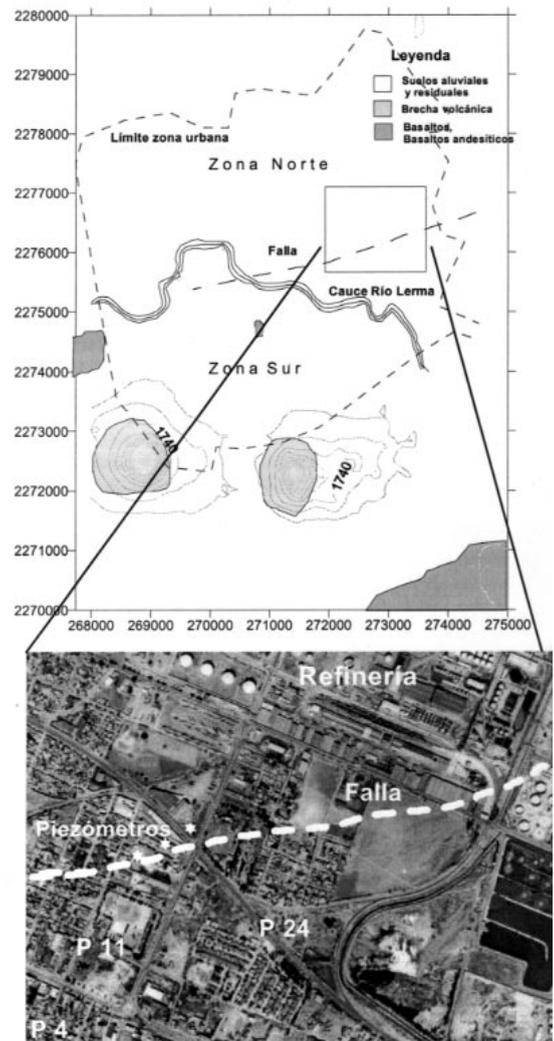


Figura 1. Plano geológico de la zona urbana de Salamanca. Area crítica.

La presencia de metales, hidrocarburos, agroquímicos y productos de transformación en el acuífero somero mostraron su vulnerabilidad a fuentes de contaminación. Para conocer el nivel de vulnerabilidad se aplicaron los métodos DRASTIC (Water table Depth, Net Recharge, Aquifer media, Soil, Topography, Impact to the Vadose zone and Hydraulic Conductivity), y AVI (Aquifer Vulnerability Index) (Aller et al, 1985; Van Stempvoort et al,

1995). Los valores DRASTIC son adimensionales y los de AVI se dan en log. de años. El mínimo total del Índice Drastic es 21 en tanto que el máximo es 226.

Mientras que DRASTIC depende de 7 parámetros, AVI solo requiere de 2, la profundidad al nivel estático y la conductividad de cada una de las capas que conforman la zona vadosa. Es por ello que ambos presentan configuraciones de vulnerabilidad diferentes. Los dos métodos requieren de información validada. Es indispensable contar con información litológica de pozos y con piezometría. La evaluación de vulnerabilidad se efectuó para el acuífero somero y dada las condiciones prevalecientes en la parte Norte de la mancha urbana, puede ser extendible al acuífero intermedio. El área mapeada se limitó a la zona urbana, 60 km<sup>2</sup> aproximadamente. En los mapas se incorporó la falla por subsidencia, las áreas verdes y el cauce del Río Lerma.

Las bajas conductividades de los materiales arcillosos provocan que el paso de solutos a través de ellos se de en tiempos muy grandes, años, mientras que si se trata de medios fracturados la circulación de solutos es bastante rápida, días, y en unos casos horas, dependiendo del espesor de la roca. Es por estas grandes variaciones que los tiempos de transito que se obtienen con el método AVI se reporten en log de años. A menor tiempo mayor vulnerabilidad y viceversa.

Dado el limitado número de pruebas de bombeo existentes se llevaron a cabo mediciones de permeabilidad *in situ* mediante un permeámetro de carga constante, para conocer los valores de conductividad hidráulica en afloramientos tipo previamente localizados y caracterizados. Las pruebas realizadas a lo largo de la falla demostraron las alteraciones a la conductividad del medio que provoca la falla. Diferencias hasta de tres órdenes de magnitud se detectaron entre el terreno "sano" y la falla.

Para evaluar la recarga neta se recurrió a información meteorológica de estaciones climatológicas del área. Se analizaron datos de los últimos diez años de 4 estaciones. La infiltración fue determinada a partir de la precipitación y de la evaporación, mediante la expresión empírica de Turk. Los resultados obtenidos fueron comparados con algunos valores determinados por balances hidrológicos regionales. Se tomó en cuenta la distribución de áreas verdes y terrenos baldíos dentro de la mancha urbana al incorporar por cuadrantes la recarga estimada. En las áreas construidas, impermeabilizadas, esta se tomo como cero.

Se contó con un número reducido de cortes estratigráficos de pozos de la zona de estudio, 25, pese a la alta densidad de obras, mas de 1,900 pozos en el Valle y cerca de 560 en el terreno que comprende el municipio. Con esta información y con apoyo de estudios geológicos y geofísicos de la zona se elaboraron mas de 10 perfiles geológicos que permitieron conocer la composición geológica de la zona vadosa y del sistema acuífero. Se incorporó información de la red piezométrica instalada por la empresa petrolera mexicana, PEMEX.

Toda la información utilizada correspondió al año de 2000. La extensión temporal de las cuantificaciones, en ambos casos, DRASTIC y AVI dependerá de los abatimientos del nivel piezométrico. Si la profundidad del nivel se incrementa, aumenta el espesor de la zona vadosa y puede variar su composición. En consecuencia ambos índices variaran. Las tendencias generales pueden conservarse. No existe criterio para normar la temporalidad de los resultados.

## VULNERABILIDAD Y RIESGO

El mapa DRASTIC (Fig 2) muestra que la zona más vulnerable corresponde a la traza de la falla. Las bajas vulnerabilidades se asocian a la presencia de paquetes arcillosos de muy baja conductividad. El mapa AVI (Fig 3) también refleja valores de alta vulnerabilidad a lo largo de la falla. Los terrenos de la refinería se localizan sobre áreas de muy baja vulnerabilidad, pero la falla que los cruza en su porción sudeste hicieron vulnerable esa zona.

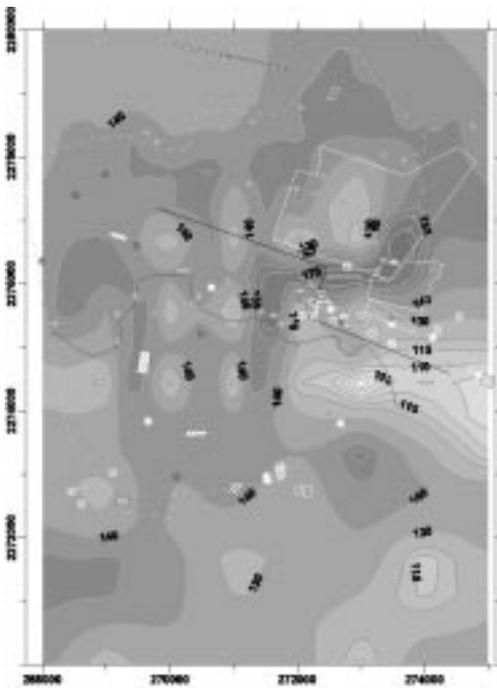


Figura 2. Índice DRASTIC con fuentes. Salamanca Gto.

Figura 2. Índice DRASTIC con con fuentes. Salamanca Gto.

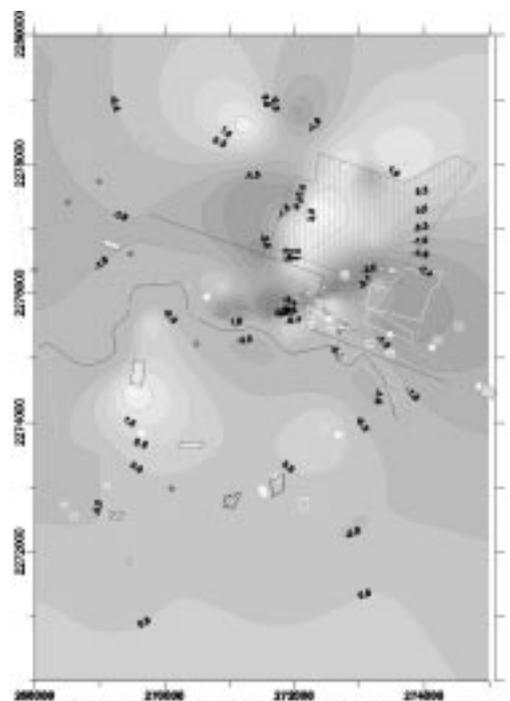


Figura 3. Índice AVI, log(años), con fuentes. Salamanca Gto.

Figura 3. Indica AVI, log (años), con con fuentes. Salamanca Gto.

Los catastros georeferenciados de fuentes potenciales de contaminación acuífera al incorporarse a los planos de vulnerabilidad transforman a éstos en mapas de riesgos potenciales. El análisis conjunto de gradientes de concentraciones de solutos proporcionara elementos para determinar su probable origen. Si éste se encuentra identificado en lixiviados de una fuente y si la tendencia es a decrecer a partir de ella, se tendrán elementos para identificar la fuente como el origen.

Los patrones de consumo de agua inciden en el nivel de riesgo por la ingesta de contaminantes. Para conocerlos se llevó a cabo una encuesta que cubrió parte de la población abastecida, 150 familias, con agua de pozos que presentaron alteración de la calidad. Los resultados muestran que la población tiene una particular percepción sobre la problemática de la contaminación del agua. Pese a que la población identificó olor, sabor y color relacionado con la presencia de hidrocarburos, tan solo el 48 % consume regularmente agua embotellada, mientras que el 16 % se abastece únicamente con agua de la red.. El costo del agua purificada también incide en su relativamente bajo consumo. El precio del m<sup>3</sup> abastecido es de aproximadamente ¢ 30 centavos de dólar.

En México es común que la población cuente con almacenamientos subterráneos para agua, cisternas, y con tanques en la parte superior de las casas, tinacos. Estos contenedores temporales “retrasan” el consumo del agua distribuida por la red de agua potable. En Salamanca el 30 % de la población que recibió agua de los pozos, 4, 11 y 24 no cuenta ni con cisterna ni con tinaco lo cual implica que recibieron agua directamente de la red. Se incrementa de esta manera el riesgo de exposición a volátiles. Tan solo el 2 % del total cuenta con algún sistema formal de filtrado del agua.

La presencia de fase libre, un par de metros de espesor, llevó a la clausura de uno de los pozos urbanos a finales de 1998. Reportes constantes de concentraciones de metales sobre la norma para agua potable obligaron al organismo operador CMAPAS, a cerrar otros dos pozos mas en 2001, el 4 y el 24. Los tres se encontraban en las inmediaciones de la falla y en las cercanías de la refinería. PEMEX ha emprendido un programa de recuperación de fase libre. Para monitorear el sistema acuífero PEMEX estableció una red de mas de 40 piezómetros. Para complementarla se instalaron dos mas a lo largo de la falla.

Tanto la Refinería como la termoeléctrica cuentan con sus propias baterías de pozos. Lo que origina que la piezometría presente tendencias hacia la zona industrial (Mejía et al, op cit). La falla facilita la inducción de flujos del acuífero somero hacia el intermedio. Los LNAPL's se desplazan hacia los mínimos piezométricos. En otros pozos cercanos a la falla no se ha detectado su presencia.

En la cercanía de uno de los basureros inactivos en la parte Sur, se localizan dos pozos de abastecimiento urbano. Las concentraciones de As y Pb han estado fuera de norma. Es muy probable que el basurero haya recibido residuos industriales con contenidos de estos metales. La zona se encuentra sobre rocas volcánicas de alta conductividad. Los gradientes de As y Pb son del basurero hacia el Río (Rodríguez *et al op cit*).

## CONCLUSIONES

La conjunción de alta vulnerabilidad con fuentes activas de contaminación origina problemas de alteración de la calidad del agua subterránea con solutos provenientes de las mismas. La extracción y distribución de esa agua contaminada se vuelve un riesgo a la salud de la población abastecida. Riesgo que se incrementa a medida que el periodo de consumo aumenta.

Aunque la zonificación obtenida mediante los métodos DRASTIC y AVI presenta diferencias, las tendencias generales se mantienen. En ambos mapas aparece la traza de la falla como una de las áreas más vulnerables. AVI permite conocer los tiempos de tránsito mínimos para solutos no reactivos, los cuales resultaron de horas en puntos a lo largo de la falla. Esto permite explicar la detección de cloroformo en uno de los piezómetros. La presencia conjunta de compuestos organoclorados y agua con cloro residual proveniente de fugas en el sistema de agua potable y en el drenaje a lo largo de la falla, lo pudiera originar. Diversos autores han encontrado correlación entre zonas vulnerables y contaminación acuífera (Kalinsky, 1994; Báez, 2001; Ramos, 2001).

Los residuales de los hidrocarburos pueden desplazarse a lo largo de la falla e incluso continuar contaminando el acuífero intermedio, única fuente de abastecimiento de agua potable. Los espesores de la fase libre presentan fuertes variaciones, de centímetros a casi dos metros en poco más de 24 horas, lo que indica que existen agentes que movilizan los hidrocarburos, como cambios en el régimen de extracción. No se descarta del todo la posibilidad de otra fuente activa.

La migración de solutos desde las zonas de incorporación, como la falla, también puede estar controlada por la presencia de lentes de arcilla y por paleocanales. El origen de los materiales arcillosos es fluvial.

El nivel de riesgo se ve incrementado por el número de contaminantes presentes y a su probable acción conjunta. Dos carcinogénicos de origen diferente, metales y compuestos orgánicos, actuando sobre el mismo tipo de órgano o tejido pueden incrementar la probabilidad de su afectación. No se cuenta con información epidemiológica que permita correlacionar causa efecto, aunque esta sea aparentemente obvia. Se tienen rutas de exposición cruzadas. Hay grupos poblacionales que han consumido agua con concentraciones "riesgosas" de metales y que viven en el entorno de la zona industrial y por lo tanto están expuestas a polvos y emanaciones. En las inmediaciones de las áreas abastecidas anteriormente por los tres pozos clausurados viven obreros que pueden estar expuestos laboralmente.

De mantenerse la intensa extracción agrícola continuará la consolidación del terreno y la falla asociada a ella. Erróneamente el grueso de la población relaciona la extracción industrial con la subsidencia, cuando el porcentaje mayoritario de los volúmenes extraídos es para la agricultura. La extensión de la falla está íntimamente vinculado con la afectación

al sistema acuifero. Areas de muy baja vulnerabilidad para principios de este siglo pueden cambiar su *status* debido a que la extensión de la falla puede facilitar la rápida lixiviación de solutos hacia el acuífero actualmente en explotación.

## AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue posible gracias al grant 32589-T del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, México. La CEAG y el Municipio de Salamanca también proporcionaron apoyo financiero. Los autores agradecen a CMAPAS y PEMEX las facilidades de accesos a la información.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aller, L. T. Bennet, J. H. Lehr, R. J. Petty, and G. Hackett., 1985; DRASTIC; A Standard System for Evaluation Groundwater Pollution using Hydrogeologic Setting, Publication EPA/600/2-85/081 US EPA, 622 pp.
- Báez A., 2001; Verificación y validación del Índice AVI de León Gto. Tesis Maestría en Protección y Conservación Ambiental, Univ. Iberoamericana campus León.
- Berlín J., Rodríguez R. and Mejía J. A, 2001; Metal tendency analysis, as and pb, in an urban aquifer system. the Salamanca Case 2. Proceed. I Internal. Workshop on Investigation, Management and Remediation of Contaminated Aquifers. Alicante España.
- Garduño V. H., Arreygue E y Rodríguez G., 2001; Mapa de riesgos de Salamanca. Reporte Técnico. Municipio de Salamanca, Univ. Nicolaita Michoacan
- II-UNAM, 2000; Segunda Campaña de Monitoreo de agua subterránea en Salamanca, Gto. Reporte Inédito. Instituto de Ingeniería UNAM, IMP, CFE
- Kalinski, R. J., Kelly. W.E., Bogardi, I., Ehrman, R.L. and Yamamoto, P. D., 1994; Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of Municipal Wells in Nebraska. Groundwater, 32(1), 31-34 pp.
- Mejía J. A., Rodríguez R. and Berlín J., 2001; Hydrodynamic and pollution of the urban aquifer system of Salamanca, Gto. The Salamanca Case 2. Proceed. I Internal. Workshop on Investigation, Management and Remediation of Contaminated Aquifers Alicante España.
- Ramos A. 2001; Validación de mapas de vulnerabilidad e impacto ambiental. Caso Río Turbio. Tesis Doctorado en Aguas Subterráneas, Posgrado en Ciencias de la Tierra UNAM. México
- Rodríguez R., Mejía J. A., Berlín J, Armienta A. y González T., 2000; Estudio para la determinación del grado de alteración de la calidad del agua subterránea por compuestos orgánicos en Salamanca, Gto. CEASG, IGF-UNAM. Reporte Téc. II
- Rodríguez R., Reyes R., Rosales J., Berlín J., Mejía J. A. y Ramos A., 2001; Estructuración de mapas temáticos de índice de vulnerabilidad acuífera en la mancha urbana de la cabecera municipal de Salamanca, Gto. Mun. Salamanca, CEAG, IGF-UNAM. Reporte Técnico il., 64 pp.
- Van Stempvoort, D., L., Ewert and L. Wassenaar. 1995; AVI: A method for Groundwater Protection mapping in the Praire Province of Canada. PPWB Report No. 114, National Hydrogeology Research Institute, Saskatoon Saskatchewan, Canada