

EL AGUA SUBTERRÁNEA EN SILAO-ROMITA, GTO. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS

Juan Manuel Lesser Illades
David González Posadas
Raymundo Estrella Chavero

Lesser y Asociados, S.A. de C.V.

Resumen

Se realizaron actividades geohidrológicas en el Valle de Silao-Romita, Gto. con el objeto de conocer el grado de explotación del agua subterránea. Se detectó la existencia de 3 horizontes acuíferos. Uno *somero* explotado por pozos y norias con entre 10 y 20 metros de profundidad total y un nivel estático a entre 4 y 6 metros. El segundo acuífero, denominado *intermedio*, fue el más explotado en décadas anteriores (1970-1980) con pozos cuyas profundidades totales variaban entre 100 y 120 metros. El nivel estático de este acuífero *intermedio* se establece de 30 a 50 metros de profundidad. Actualmente estos dos acuíferos se encuentran prácticamente agotados. El tercer acuífero denominado *profundo*, es captado mediante perforaciones que alcanzan más de 150 metros y el nivel estático se ubica a entre 60 y 100 metros. Es el principal horizonte en explotación actual.

La mayor parte del acuífero se encuentra en materiales granulares, excepto hacia el oeste (La Muralla), donde se presentan rocas riolíticas fracturadas. Existen 1984 aprovechamientos de agua subterránea que extraen 408.4 millones de m³/año; el 93% se utiliza en agricultura. Se aplicó el modelo matemático VisualModflow, el cual se alimentó con la información de casi 2000 pozos. Se simularon 5 capas y se calibró con alto grado de precisión. La interpretación del análisis isotópico permitió diferenciar el agua de La Muralla con un origen independiente a la del Valle de Silao-Romita. Finalmente, se recomienda implementar un programa de cambio de uso del agua, de agrícola a potable. Con ello se pretende, dar solución al problema de abastecimiento de las Ciudades de Silao y Guanajuato, sin aumentar la extracción actual

Palabras clave: Agua subterránea, acuífero, superficie piezométrica, hidrogeología, transmisibilidad, isótopos, modelo matemático.

Introducción

El agua subterránea constituye un pilar del desarrollo agropecuario e industrial del Estado de Guanajuato y un reclamo de la sociedad. La Comisión Estatal de Agua y Saneamiento del Estado (CEASG), viene realizando la actualización de los estudios geohidrológicos de los acuíferos existentes en todo el estado, cuyo conocimiento y seguimiento se había detenido en los últimos años debido, entre otras cosas, a los problemas económicos por los que a atravesado el país. A partir del año de 1997, la CEASG reactivó los estudios geohidrológicos a fin de

programar el manejo de los acuíferos. El presente trabajo corresponde a los resultados de uno de dichos estudios, en este caso para el Valle de Silao-Romita, elaborado por la Compañía Lesser y Asociados, S.A. de C.V., durante el año de 1998

Los objetivos principales del trabajo fueron: Conocer la cantidad de aprovechamientos de agua subterránea existentes y su volumen de extracción; realizar un balance del agua subterránea y; aplicar un modelo matemático del acuífero para a través de él elaborar un proyecto de manejo del agua subterránea.

Localización

El Valle de Silao-Romita se localiza en la parte centro del Estado de Guanajuato, entre los paralelos 20°42' y 21°09' de latitud norte y los meridianos 101°10' y 101°44" de longitud oeste. Incluye principalmente a los municipios de Silao y Romita y abarca en total 1950 kilómetros cuadrados. En la porción oriental del área de estudio se encuentra la Ciudad de Guanajuato y en el límite sur, parte de la Ciudad de Irapuato.

El valle en estudio presenta una forma plana entre Silao y Romita, y esta limitado por la Sierra de Guanajuato al noreste y este, por las sierras de Penjamo y El Veinte al suroeste y sur, así como por lomeríos hacia el noroeste. El drenaje superficial escurre de norte a sur a través de dos corrientes principales, el Río Silao y el Río Guanajuato, los cuales confluyen en la parte sur de la zona de trabajo.

Se censaron un total de 1984 aprovechamientos de agua subterránea de los cuales 1592 se encuentran activos. De los 1592 aprovechamientos activos, 1390 se utilizan para la agricultura, 176 para agua potable, 15 en la industria y 11 en abrevadero.

Geología

El Valle de Silao-Romita forma parte del eje neovolcánico caracterizado por existir numerosos volcanes. Las sierras se encuentran constituidas por lavas y tobas tanto de composición basáltica y Edad Cuaternaria como riolitas del Terciario. Los valles corresponden a zonas planas donde se presentan acumulaciones de sedimentos lacustres del Terciario y aluviones del Cuaternario.

En la zona de trabajo se pueden distinguir dos grandes grupos de rocas. El primero presenta edades que van del Terciario al Reciente y forman el centro del valle y lomeríos del norte, oeste y sur, los que constituyen el acuífero de la región. El segundo gran grupo corresponde a la sierra de Guanajuato, donde aflora un complejo igneo-metamórfico-sedimentario. Las rocas han sido descritas informalmente en algunos trabajos y la denominación aquí presentada fue obtenida y adaptada del estudio realizado por Ariel Construcciones (1991).

En la sierra de Guanajuato afloran rocas del Terciario Inferior, cretácicas y pre-cretácicas que se considera forman el basamento del acuífero. Se hace notar que hacia el valle de Silao-Romita, estas rocas no han sido detectadas, con excepción de 2 pozos de La Muralla, donde se reportó el conglomerado rojo de Edad Terciaria a 300-500 metros de profundidad, el cual sobreyace al Cretácico.

La unidad geológica denominada Terciario Volcánico Riolítico (Tvr) corresponde a una serie de rocas volcánicas extrusivas de composición riolítica. Sus mayores afloramientos se encuentran sobre el poniente y sur del valle. Incluyen riolitas, ignimbritas, tobas y vidrios. Presentan coloraciones variadas, predominando tonalidades marrones y rojizas. En diversas perforaciones efectuadas se ha detectado a esta unidad riolítica en el subsuelo, donde se caracteriza por formar acuíferos de buen rendimiento además de tener la particularidad de contener agua termal, generalmente entre 30 y 40°C (figura 1).

La unidad denominada Terciario Continental (Tc) Corresponde a sedimentos de origen lacustre entre los que se incluyen lutitas, margas, calizas y areniscas calcareas, generalmente de colores blanquesinos. Su estratificación y consolidación es muy variable, encontrándose zonas donde los estratos se encuentran bien definidos y su consistencia es compacta; sin embargo, hacia otras zonas se llegan a encontrar prácticamente delesnables y a perder o dificultar la observación de los estratos. Esta unidad sedimentaria lacustre ha sido estudiada por varios autores. Presenta continuidad hacia gran parte del centro de la República Mexicana. Estratigráficamente se encuentra sobreyaciendo o interdigitada con riolitas del Terciario y cubierta por rocas volcánicas Cuaternarias o materiales granulares del Terciario Superior. Estudios palinológicos realizados por la exSARH, le asignaron una edad del Terciario inferior y medio.

Se conoce como Terciario Superior Continental (Tsc) a una serie de materiales granulares que incluyen gravas, arenas y arcillas, y que en parte se encuentran semiconsolidadas formando un conglomerado. Afloramientos de esta unidad se encuentran principalmente en los flancos de las Sierras. Se considera a esta unidad más nueva que los sedimentos terciarios descritos en el párrafo anterior (Tc) y más antiguos que los basaltos cuaternarios (Qvb), aunque no existen mediciones de su edad. Se le ha asignado al Terciario Superior. En perforaciones se encuentra interdigitada en su base con basaltos compactos.

Por lo que respecta al Cuaternario Volcánico Basáltico (Qvb) corresponde a materiales del Cuaternario que se encuentran formando aparatos volcánicos, así como en forma de corrientes lávicas. Incluye principalmente a basaltos vesiculares de color negro, en ocasiones vesiculares y fracturados, y en otras compactos. Intercalados se encuentran tezontles, tobas y vitrificados. Forman la Sierra del Veinte, al sur de la zona de trabajo.

Se formó la sección geológica que se muestra en la figura 2, tomando en cuenta la geología superficial, cortes litológicos y resultados de geofísica. En ella se puede observar el espesor de los materiales (Tsc) que constituyen la mayor parte del subsuelo, así como la presencia de

horizontes arcillosos obtenidos de los cortes litológicos. Otro aspecto notable, es que las rocas riolíticas hacia el poniente se encuentra a alrededor de 100 metros de profundidad, mientras que hacia Silao y el oriente de la zona no han sido detectadas, razón por la que se marcaron inferidas.

Características Hidrogeológicas de las Formaciones

Las unidades geológicas se pueden clasificar de acuerdo a su comportamiento para permitir la infiltración, circulación y almacenamiento de agua subterránea en: rocas permeables y rocas impermeables. En la figura 3 se muestra la columna estratigráfica de la zona, así como el carácter hidrogeológico de las formaciones.

Las rocas y materiales cuaternarios correspondientes a los basaltos y a los espesores superficiales de gravas, arenas y arcillas que se encuentran sobre los valles, los que se clasifican como permeables. Mediante cortes litológicos de pozos, se observó que en muchos sitios se encuentran sobreyaciendo a una capa de materiales arcillosos que ocasionan la formación de un nivel de aguas superficiales. Este efecto se comprobó con la profundidad total de muchos pozos y norias, así como en la posición del nivel freático. Debido a lo anterior, se diferencié e identificó dentro de esta capa a un horizonte acuífero denominado acuífero *somero*.

Entre los materiales de Terciario Superior Continental predominan los sedimentos granulares y se les detectó en muchos sitios sobreyaciendo a basaltos compactos y/o arcillas que se comportan como impermeables. Estos materiales granulares presentan permeabilidad y constituyen una zona acuífera denominada en el presente trabajo acuífero *intermedio*.

La parte basal del Terciario Superior Continental se encuentra constituida por materiales granulares lacustres interdigitados con basaltos fracturados, ambos permeables. Estos, sobreyacen tanto a riolitas como a otros sedimentos lacustres arcillosos y que en su conjunto constituyen un horizonte acuífero denominado en el presente trabajo como acuífero *profundo*.

Los 3 horizontes acuíferos mencionados en los párrafos anteriores, correspondientes a acuífero *somero*, *intermedio* y *profundo*, presentan niveles piezométricos diferentes que los distinguen. El acuífero superficial es fácilmente identificable en el cauce del Río Guanajuato, aguas abajo de la presa Purísima, donde existen un gran número de pozos de entre 10 y 20 metros de profundidad total con niveles estáticos a entre 4 y 6 metros. El acuífero intermedio fue el principalmente explotado en décadas anteriores (1970-1980) con pozos cuyas profundidades totales variaban entre 100 y 120 metros. En la década de los 80's cobro auge la veda que impedía la perforación de nuevos alumbraamientos para disminuir el grado de sobreexplotación y evitar el abatimiento de los niveles. Es interesante hacer notar que los reglamentos de la veda permitían nuevas perforaciones siempre y cuando se alcanzaran profundidades del orden de 300 metros y se ademara y cementara la porción o mitad superficial del pozo, con el objeto de explotar solo el acuífero *profundo*, que ya se había detectado y proteger, en ese tiempo, el principal acuífero en explotación, correspondiente al denominado en este trabajo como *intermedio*.

Actualmente la explotación del acuífero *intermedio* ha ocasionado su abatimiento casi total, lo que ha obligado a la sustitución por pozos más profundos.

Geofísica

La geofísica, en especial en su modalidad de sondeos eléctricos resistivos, ha sido un método indirecto usual en la zona de trabajo. La gran experiencia acumulada durante un gran número de años ha mostrado que los sondeos eléctricos verticales son un método auxiliar para determinar el tipo de materiales que constituyen el subsuelo hasta 100 o 200 metros de profundidad. Conforme se profundiza, la calidad y veracidad de la información de los sondeos eléctricos verticales disminuye. Por lo anterior se programó la aplicación de un método geofísico que permitiera obtener el conocimiento del subsuelo a mayor profundidad, tendiendo a identificar el basamento del acuífero. Se realizaron sondeos en su modalidad de *electromagnéticos*, los cuales fueron realizados por la Comisión Federal de Electricidad, utilizando un equipo modelo Stratagem de la marca Geometrics. Los resultados auxiliaron a la identificación del basamento utilizado en el modelo matemático.

Funcionamiento del Acuífero

El valle de Silao-Romita, tiene una forma prácticamente plana. El subsuelo está constituido por una alternancia de materiales aluviales, sedimentos lacustres y coladas de lava que en su mayoría se comportan como permeables y permiten la infiltración y circulación de agua en el subsuelo. Presentan intercalaciones de horizontes arcillosos que provocan el almacenamiento de agua a diferentes profundidades.

El valle se encuentra semi-limitado al oeste por los lomeríos de La Muralla, al norte y este por la Sierra de Guanajuato y al sur por las sierras de Pénjamo y El Veinte. Estas sierras con excepción de la de Guanajuato, se encuentran constituidas por rocas ígneas estrusivas existiendo dos tipos principales, basaltos y riolitas. En general las elevaciones topográficas permiten la infiltración del agua de lluvia y constituyen zonas de recarga al acuífero.

La Sierra de Guanajuato corresponde a un complejo principalmente ígneo-sedimentario que se comporta como impermeable.

En la mayor parte de la zona de estudio existe una capa de arcillas impermeables a alrededor de los 30 metros de profundidad, que ocasiona la formación de un horizonte acuífero superficial cuyo nivel se establece a poco más de 2 metros de profundidad. Se le denominó horizonte *acuífero somero*. Su principal zona de afloramiento se ubica en el cauce del Río Guanajuato, aguas debajo de la presa Purísima.

Entre los 100 y 120 metros de profundidad, se encuentra otro horizonte arcilloso impermeable que en ocasiones pasa lateralmente a un basalto compacto también impermeable. Estos

materiales ocasionan la formación de una zona acuífera entre los 30 y 120 metros de profundidad denominada aquí *acuífero intermedio* cuyo nivel se encuentra a profundidades variables, predominando el rango de 30-50 metros. Los pozos que se encuentran explotando a este acuífero alcanzan profundidades del orden de 100-120 metros. Durante la década de los 70's, el Valle de Silao-Romita se encontraba explotado por un gran número de pozos que extraían agua de este horizonte acuífero, empezando a mostrar signos de sobreexplotación que repercutían en el abatimiento de los niveles. Por ello, la exSecretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos estableció veda a la perforación de nuevos pozos. Ya para dicha década de los 70's, se conocía que a mayor profundidad existían sedimentos lacustres y lavas riolíticas con potencial geohidrológico y que frecuentemente presentaban termalismo. La exSARH emitió criterios para el otorgamiento de permisos para perforación, que indicaban que los pozos nuevos deberían explotar la zona acuífera de mayor profundidad, para lo cual deberían cementar la porción superficial del pozo y evitar así aumentar la sobreexplotación de los acuíferos superficiales.

En los estudios que realiza la CEASG se observa que, en la mayor parte de la zona de trabajo, los horizontes acuíferos identificados como *somero* e *intermedio* han quedado agotado en varias zonas y en otras, se encuentran a punto de secarse. Así mismo, que el horizonte de mayor extracción corresponde al denominado acuífero *profundo*. El acuífero *profundo*, presenta una profundidad al nivel estático entre 60 y 100 metros.

A partir de las mediciones de profundidad al nivel estático y las cotas del terreno, se calculó y configuró la elevación del nivel estático respecto al nivel del mar para el acuífero *profundo* (figura 4), con valores del mes de julio de 1998, en ella se observa que existen curvas que van de 1630 a 1740 metros. Los valores mayores se encuentran en las estribaciones de las elevaciones topográficas del norte, a partir de donde descienden gradualmente hacia el centro del Valle de Silao-Romita, donde se llegó a trazar la elevación 1630 msnm. A partir de las sierras, se trazaron las curvas 1690-1700 msnm que desciende al centro del valle a 1640, de donde se deduce un flujo de agua subterránea de la sierra hacia el centro del valle. Al sur de Silao se encuentra un cono piezométrico cuya porción más profunda se ubica a la cota 1630 msnm, hacia donde convergen los flujos de agua subterránea.

Se calculó el volumen de extracción de agua subterránea en cada pozo. La extracción total para el año de 1998 fue de 408.4 millones de m³/año. Más adelante se describirá el área utilizada para el balance de agua subterránea, en donde la extracción fue de 305.4 millones m³/año.

Por lo que respecta a la evolución del nivel estático respecto al tiempo, la información existente es de tipo general. Se han reportado volúmenes de extracción para años anteriores englobando a los horizontes acuíferos *somero*, *intermedio* y *profundo*. La extracción principal en décadas anteriores, correspondió a los horizontes *intermedio* y *somero*. Los datos más recientes se recopilaron en la CNA y corresponden al año de 1996. Tomando en cuenta la información disponible se calculó la evolución sufrida por el nivel estático del acuífero *profundo* entre 1996 y 1998. Se obtuvo una variación de almacenamiento para la zona considerada dentro del balance geohidrológico de -33.33 millones de m³/año.

Se realizaron 17 pruebas de bombeo. Los valores de transmisibilidad obtenidos van de 11×10^{-3} a 0.3×10^{-4} m²/seg. El coeficiente de almacenamiento calculado donde el acuífero es libre varió de 0.03 a 0.11 y, para los sitios donde el acuífero es semiconfinado de 0.00002 a 0.00003. (Freeze, 1979)

En base a la configuración de la elevación de la superficie piezométrica respecto al nivel del mar (figura 4), se trazaron celdas para el cálculo de la entrada por flujo subterráneo. Se marcaron 21 celdas a partir de las cuales se obtuvo la cantidad de agua que ingresa al acuífero en forma de flujo subterráneo procedente de las elevaciones topográficas. Para el cálculo del caudal de entrada se utilizó la fórmula siguiente: $Q = Tbi$. Donde Q es el caudal de agua en litros por segundo, T corresponde a la transmisibilidad del medio en m²/seg; b es el ancho de la celda e ; i corresponde al gradiente hidráulico de la celda. (Fetter, 1987)

Para efectuar el balance de agua subterránea en un acuífero, se delimita el área sobre la cual se tiene un buen control piezométrico, por lo que llegan a quedarse fuera del área de balance pozos aislados, acuíferos colgados o pequeños subsistemas con cierta independencia del acuífero principal. En el presente estudio se aplicó la ecuación de balance al acuífero *profundo*.

La ecuación de balance de agua subterránea establece que las entradas son iguales a las salidas más el cambio de almacenamiento. Las entradas están constituidas por el flujo subterráneo que alimenta al valle en las estribaciones de las sierras (E_s), así como a la infiltración vertical que recibe el acuífero y que puede corresponder a infiltración por agua de lluvia, a retornos de riego, a infiltración por pérdida en canales, así como a infiltración por aporte de los horizontes acuíferos superficiales que pueden estar drenando hacia mayores profundidades. Todos estos conceptos se englobaron dentro del renglón denominado infiltración vertical, el cual se consideró como incógnita dentro de la ecuación de balance.

Por lo que respecta a las salidas de agua del acuífero, se incluyó a las salidas subterráneas (S_s) que en el presente caso son nulas debido a que no existen flujos subterráneos de salida del acuífero hacia otras áreas. La principal forma como se descarga el acuífero corresponde a la extracción por bombeo (Ext), la que fue calculada y asciende a 305.4×10^{-6} m³/anuales para la zona incluida dentro del área de balance y correspondiente al acuífero *profundo*. Se hace notar que la extracción total para la zona en estudio incluye a los acuíferos *superficial e intermedio* con una extracción de 50×10^{-6} m³/año, también se incluyen los pozos fuera del área de balance con extracción de 53×10^{-6} m³/año, los que en conjunto equivalen a la extracción total de 408.4×10^{-6} m³/año.

Tomando en cuenta los conceptos anteriores, la ecuación de balance para el acuífero profundo queda como sigue: $E_s + I_v = Ext + A_s$; de donde $I_v = Ext - E_s + A_s$

Los resultados del balance muestran que existió una entrada subterránea de 130.29 millones de m³/anuales, una infiltración vertical al acuífero profundo de 141.8; una extracción de 305.4 Mm³/anuales. La diferencia entre la entrada de agua al acuífero que asciende a 272.09 Mm³/año

y la salida en forma de explotación por bombeo que es de 305.4, corresponde al cambio de almacenamiento o sea -33.3 millones de m^3 /anuales.

Isótopos Ambientales

Con el objeto de obtener un mayor conocimiento del funcionamiento de los acuíferos, se llevo a cabo una interpretación de isótopos ambientales. Esta, tuvo por objeto determinar el origen de la recarga a los acuíferos, identificar si existen uno o varios orígenes del agua subterránea, así como obtener un mayor conocimiento sobre la relación entre las zonas acuíferas de La Muralla, Puenteillas y el Valle de Silao-Romita. Las muestras obtenidas fueron analizadas por el Laboratorio de Isotopía Ambiental de la Universidad de Waterloo, en Ontario, Canadá.

Para la interpretación isotópica se graficaron los resultados de deuterio y oxígeno 18 (figura 5), donde se observa su distribución general, así como la recta correspondiente a la línea meteórica mundial (Domenico, 1990). Dentro de la misma gráfica se trazó la probable recta que corresponde a la línea meteórica local, deducida de acuerdo a la distribución de los puntos en la gráfica. La mayor parte de las muestras se encuentran en el rango entre -71 y -77 unidades de deuterio y, -10.2 y -9.5 unidades de oxígeno 18. Se marcaron con simbología que identifica a cada punto de la gráfica de acuerdo a la zona en que se encuentra ubicada. Se distinguieron las 6 zonas siguientes: (1) Zona Puenteillas que incluye al área con los pozos que abastecen a la Ciudad de Guanajuato; (2) Zona La Muralla que incluye a los pozos del occidente de la zona de trabajo, los que se encuentran explotando un acuífero en rocas riolíticas que se utiliza para el abastecimiento de la Ciudad de León. Tres de estas muestras correspondientes a los pozos SAPAL-1, SAPAL-9 Y SAPAL-10, se ubican fuera del área de trabajo al oeste del pozo 42. (3) Zona General Motors ubicada al oriente de Silao en donde se encuentran 4 pozos profundos, (4) Zona Silao-Romita donde los aprovechamientos que se encuentran en el valle entre los poblados de Silao y Romita, corresponden en su mayoría a pozos profundos y en menor proporción a pozos que captan agua de los acuíferos *intermedio* y *profundo*, (5) Zona norte del valle y (6) Zona sur del que valle pertenecen tanto al acuífero *profundo* como al *somero e intermedio*.

En la zona norte del valle la mayor parte de los puntos del acuífero *profundo*, se ubican entre los -76 y -78 unidades de deuterio. El agua del pozo 1927, se encuentra en la gráfica ligeramente a la derecha del área típica de esta zona, aparentemente debido a que presenta agua con cierto grado de evaporación y corresponde a una mezcla de los acuíferos *profundo* e *intermedio*. Las muestras 517 y 2038 corresponden a mezclas, mientras que la del pozo 1930 presenta un contenido isotópico disparado del resto, por lo que no se consideró representativa.

Los pozos 828, 941, 1191, 1102 y 1322 de la zona sur caracterizan isotópicamente al agua de esta porción. Tienen un contenido de deuterio entre los -71 y -73 unidades. Las muestras de los pozos 1878 y 230, presentan concentraciones menores a las consideradas como representativas de este grupo, haciéndose notar que corresponde al acuífero *intermedio*.

Se obtuvieron 8 muestras de la zona Silao-Romita, las cuales se encuentran en un área que caracteriza isotópicamente a esta zona, ubicada entre los -72 y -78 unidades de deuterio y entre -9.9 y -10.5 unidades de oxígeno 18. Todos estos aprovechamientos corresponden al acuífero *profundo*. El pozo 975 que también corresponde al acuífero *profundo*, presenta un contenido isotópico mayor, considerándose como disparado. En contraste con el grupo anterior, los pozos 941, 575, 446, 230 corresponden al acuífero *intermedio* y presentan un contenido isotópico ligeramente mayor. Este mayor contenido es debido, por una parte, a la mezcla y por otra parte indica que el agua ha presentado cierto grado de evaporación, en comparación con las muestras del acuífero *profundo*.

Por lo que respecta al acuífero de La Muralla, se obtuvieron y analizaron muestras de 6 pozos. Estos, caracterizan al acuífero de La Muralla, con valores de deuterio que van de -72 a -75 y oxígeno 18 que va de -9.6 a -10.0. Pozos cercanos correspondientes a las muestras 93, 68 y 163, extraen agua del acuífero *intermedio* y sus valores isotópicos son ligeramente mayores a los del grupo anterior, principalmente en oxígeno 18, lo cual indica efectos de evaporación. La muestra del pozo 92 presenta concentraciones isotópicas altas. Se considera que no es representativa y que posiblemente corresponda a errores de muestreo. Efecto similar corresponde al pozo 158, representativo de un acuífero *somero* con un contenido isotópico menor que el característico de esta zona.

Por lo que se refiere a la zona de Puentecillas, seis de los pozos muestreados corresponden al acuífero *profundo* y el pozo 1379 al acuífero *superficial*. Los pozos 1394, 1405 y 1381 presentan contenidos isotópicos entre los -70 y -76 unidades de deuterio y entre -9.6 y -9.9 unidades de oxígeno 18. Se circundó el área dentro de la gráfica en donde se ubican dichos pozos, la cual se consideró representativa de la zona de Puentecillas. Los pozos 1385 y 1383, corresponden a agua evaporada del mismo origen que la representativa de Puentecillas. La evaporación del agua se considera que se llevo a cabo en la superficie y podría ser aporte del agua de la presa Purísima a través de fracturas. La muestra del pozo 1379 presenta un contenido diferente y elevado en oxígeno 18, correspondiendo al agua que identifica al acuífero *somero*, el cual presenta un cierto grado de evaporación. La variación en los datos coincide con la disparidad observada en la piezometría, ya que se encontraron profundidades al nivel del agua muy variables de un sitio a otro; de igual manera caudales de extracción no uniformes y, niveles de bombeo muy profundos y variables. La disparidad en los datos geohidrológicos concuerda con la variabilidad de los datos isotópicos.

Los diferentes valores isotópicos que caracterizan a cada una de las zonas marcadas, indican que corresponden a aguas con cierta diferencia en su origen. El contenido isotópico entre la zona sur y la zona norte es diferente, indicando también una diferencia en la zona de recarga. En la figura 6 se marca la dirección de flujo de la recarga para cada una de las zonas, observándose que en el norte esta proviene de las partes altas de la Sierra de Guanajuato, mientras que en el sur proviene de las estribaciones de la Sierra de El Veinte. Se observa también que el agua de lluvia que recarga a la zona norte, se infiltra en áreas topográficas de

mayor altitud, en contraste con el agua que recarga la zona sur, la que se infiltra a una menor altitud.

Por lo que respecta a la zona de La Muralla, y hasta el estrechamiento de la presa de La Gavia, el acuífero riolítico recibe su recarga principalmente del noroeste. Su contenido isotópico es diferente al resto de las áreas marcadas, de donde se deduce que el agua de las riolitas e ignimbritas que explota La Muralla, es independiente a la recarga y almacenamiento del acuífero del Valle de Silao-Romita.

En relación a la altura de recarga, el contenido isotópico de la zona sur es mayor que en La Muralla, y menor que el agua del norte. La variación en deuterio indica que los pozos de la zona norte presentan su recarga a mayor altura (Sierra de Guanajuato); los pozos de la zona sur presentan su recarga a baja altura (Sierra de El Veinte); mientras que el agua del acuífero de La Muralla se recarga a una altura intermedia entre las dos zonas mencionadas inicialmente.

Por lo que se refiere al área de Silao-Romita, la recarga proviene de los lomeríos que se encuentran ubicados al noroeste de dicha zona.

Modelo Matemático del Flujo del Agua Subterránea

El desarrollo tecnológico tanto en los paquetes de modelación (Software) como en equipo (Hardware), presenta continuos avances. En la segunda mitad de 1998 se utilizó para el acuífero del valle de Silao-Romita el modelo de flujo Visualmodflow versión 2.72, originalmente Modflow (Mc Donald, 1984) actualizado en julio de 1998 por Waterloo Hydrogeologic Inc. Esta no es la primera aplicación de su tipo en México, pero si una de las primeras. Otro aspecto que curiosamente se desea dejar testimonio, es el que a la fecha es la versión más moderna, con el objeto de comparar y analizar la evolución que sufran estas técnicas en el futuro próximo.

La descripción de los datos con los que fue formado el modelo se comentan a continuación, utilizando el orden establecido para su construcción. Previamente a la formación del modelo, se construyó un archivo en autocad (.dxf) con los principales rasgos topográficos que permitieran contar con una base de referencia. El inicio de la construcción del modelo se realizó utilizando la base topográfica mencionada, sobre la cual se trazó una malla de elementos ortogonales de 1000 metros por lado que incluyó 41 columnas por 39 renglones. Se consideraron y marcaron como celdas inactivas a aquellas que forman las principales elevaciones topográficas (figura 7).

Se consideraron cinco capas dentro del modelo (figura 8). La primera de ellas corresponde a los aproximadamente 100 metros superficiales y comprende a la porción donde se aloja el horizonte acuífero *intermedio*. La segunda capa tiene un espesor aproximado de 15 metros y representa a la zona arcillosa que divide a los acuíferos. La principal zona acuífera corresponde al acuífero *profundo* y se dividió en tres capas denominadas capa 3, capa 4 y capa 5. La superficie del terreno o cima de la capa 1 fue creada en *Surfer* (.grd). Por lo que se refiere a la base de la capa 1, ésta correspondió a la posición de los materiales arcillosos que sirven de sello. También fue

capturada en *Surfer*. La cima de la capa 3 correspondió a la base de la capa 2, mientras que la base de la capa 5 corresponde al basamento obtenido de geología y geofísica. Las capas 1 y 2 corresponden a zonas inactivas. Por lo que se refiere a las capas 3, 4 y 5 representan al acuífero profundo, donde se asignaron los parámetros de conductividad hidráulica (permeabilidad) en metros por día, coeficiente específico y rendimiento específico (adimensional). Las fronteras consistieron en celdas perimetrales a las zonas montañosas, dándoles para fines del modelo un carácter impermeable lo cual se corrige adoptando recarga lateral donde las elevaciones topográficas son permeables.

La conductividad hidráulica para la capa 3 varió de 0.001 a 2.8 m/día y fue deducida de acuerdo al tipo de materiales existentes y a los resultados de las pruebas de bombeo (Fletcher, 1987). A la capa 4 se le asignó una conductividad de 0.001 a 5 m/día. Por lo que respecta a la capa 5, la conductividad varió de 0.01 a 0.2 m/día. En la figura 9 se muestra la distribución de la conductividad hidráulica en las capas 3, 4 y 5. El coeficiente específico (S_s) es la capacidad de compresibilidad de los materiales y se obtiene dividiendo el coeficiente de almacenamiento entre el espesor del acuífero. El rendimiento específico (S_y) es igual a la porosidad efectiva en los acuíferos libres (Anderson, 1996). Cuando el acuífero es semiconfinado el modelo utiliza S_s . En la capa 3 existen zonas donde el acuífero funciona como libre. El valor de S_y que predominó para esas áreas fue de 0.05 a 0.10. Las capas 4 y 5 funcionan como semiconfinado, predominando un S_s de entre 0.000003 a 0.005. En la figura 10 se presentan los valores adoptados de S_y y S_s para las capas 3.

Se formó un archivo que incluye alrededor de 800 pozos que se encuentran extrayendo agua del acuífero *profundo* e *intermedio* y de los cuales se conoce su régimen de operación. El archivo de volúmenes de extracción, incluyendo identificación y localización de cada uno de los aprovechamientos, se capturó y presenta en el archivo vmw. En el mismo archivo, se alimentó cada pozo con la profundidad total y el tramo ranurado con el objeto de que la extracción de agua del pozo se aplique a la capa o capas correctas.

El horizonte arcilloso (capa 2) que separa los dos subsistemas acuíferos, ocasiona que el horizonte acuífero *profundo*, se encuentre semiconfinado en la mayor parte del área de balance. Existe una diferencia de cargas hidráulicas entre el nivel estático del horizonte *intermedio* y el nivel piezométrico del horizonte *profundo*, lo cual provoca una recarga del *intermedio* hacia el *profundo*. Sin embargo, debido a la baja permeabilidad del horizonte arcilloso que los separa, esta no es de gran magnitud. De acuerdo a las observaciones de campo, se concluyó que (a través de pozos que conectan a ambos horizontes acuíferos) existen "chorreaderos" que provocan una recarga del *intermedio* hacia el *profundo*. Tomando en cuenta lo anterior, se estimó una recarga de 3 lps por pozo del acuífero *intermedio* al *profundo*.

La capa 1 del acuífero *intermedio*, recibe su principal recarga a través de agua de lluvia y retornos de riego con una lámina media en cada celda. La descarga de esta capa ocurre a través de la extracción por pozos de bajo rendimiento y el drenado por cascadeo en pozos hacia el acuífero profundo. A las capas 3, 4 y 5 correspondientes al acuífero profundo, se le asignó

recarga lateral mediante pozos de recarga en las celdas perimetrales. La recarga proveniente del acuífero *intermedio* se simuló mediante pozos ficticios, a los cuales se les antepuso la letra *r* y se incluyen en un archivo .vmw.

Se consideró al año de 1996 como las condiciones iniciales, debido a que esta fue la única fecha que cuenta con datos que permiten la configuración del acuífero *profundo*. Las cargas iniciales se capturaron en *excel* y se salvaron con la extensión .txt para posteriormente pasarlas a Código AscII con terminación .xyz. El archivo para las capas 3, 4 y 5 se salvó como .xyz; para la capa 5 se nombró como *capa5.xyz*. Se formó la configuración de la elevación del nivel estático para los valores **observados** en el año de 1998, para las capas 3, 4 y 5. Estas, fueron capturadas en *autocad* y salvadas con la extensión .dwg, con el objeto de efectuar comparaciones entre los resultados del modelo y los observados en el campo.

Durante la calibración se realizaron correcciones y ajustes que van desde cargas iniciales hasta parámetros subestimados o sobreestimados. Se utilizaron los criterios que para calibrar dispone el *vmodflow*, tales como curva de calculado-observado, configuración de abatimientos y configuración de recuperaciones, así como las curvas de abatimiento contra tiempo para cada pozo de observación. Se corrió el modelo dándole un tiempo de 2 años a partir de 1996. Los resultados al año de 1998 fueron comparados con los observados en el mismo año. Se efectuaron varias corridas por el método de ensayo y error, modificando algunos de los parámetros hidráulicos del acuífero hasta obtener una configuración que presentaba similitud entre el valor observado y el calculado. Se alimentó al modelo con los 39 pozos de observación, correspondiendo a los pozos piloto de piezometría. La gráfica de calibración que incluye los valores observados contra los calculados para el año de 1998, se alcanzó un error de RMS igual a 1.836%. La comparación entre las configuraciones del resultado calculado por el modelo y el observado, se presenta en la figura 11. Una vez calibrado el acuífero al año de 1998, se efectuaron simulaciones para los próximos 2 y 5 años, considerando una extracción similar a la actual. Las predicciones calculadas por el modelo se presentan en la figura 12 donde se observan abatimientos anuales de entre 1 y 5 metros.

Plan Maestro de Uso del Agua

Para la solución integral al abastecimiento de agua potable de las Ciudades de Guanajuato y Silao, se recomienda la integración de un *plan maestro de uso del agua* que incluya determinar la factibilidad de permutar el uso actual del agua al sur de Silao, de riego a potable. El plan maestro involucra estudiar la factibilidad de: (1) La adquisición de terrenos con 25 pozos al sur de Silao, con un caudal total de 750 lps; (2) la construcción de una conducción a lo largo de la línea de ferrocarril; (3) captar el agua al sur de Silao para ser conducida y destinada a Silao y a la Ciudad de Guanajuato; (4) plantear la línea de conducción en varias etapas de captación; (5) determinar la posibilidad de adicionar zonas de suministro a lo largo de la línea de conducción, así como el desarrollo de un corredor industrial. (figura 13).

Discusión

Actualmente el acuífero es explotado por medio de un gran número de pozos que utilizan el agua en su mayor parte para riego. La Comisión Nacional del Agua reglamenta la explotación del acuífero principalmente manteniendo veda a nuevos alumbramientos en prácticamente todo el Estado. Por otra parte, los propietarios de permisos o asignaciones para la extracción de agua subterránea tienen derechos que les permiten hacer la reposición de su pozo cuando éste se agota o baja notablemente su caudal de extracción. La reposición puede hacerse junto al pozo antiguo o bien en otro sitio, siempre y cuando se ubique dentro de la misma zona acuífera, con ciertas limitaciones a fin de evitar reposiciones en zonas críticas.

En el valle de Silao-Romita muchos de los pozos se encuentran explotando agua de los acuíferos *somero* e *intermedio*, los que están en proceso de extinción. Ello, ocasiona que se estén llevando a cabo reposiciones de pozos a mayores profundidades. De acuerdo a los derechos de cada permiso o concesión, al agotarse un pozo puede, mediante la autorización requerida por la CNA, llevarse a cabo una reposición. Estas nuevas perforaciones de reposición a mayor profundidad, implican una mayor extracción de agua del acuífero *profundo*, por lo que se seguirá incrementando la extracción de agua que se lleva a cabo del acuífero *profundo*.

La sobreexplotación existente ocasiona abatimientos en los niveles de bombeo, por lo que es necesario intensificar actividades para un manejo que disminuya los efectos nocivos de dicha sobreexplotación. Actualmente el manejo de los acuíferos se restringe solo a la veda de nuevos alumbramientos y en menor proporción a la aplicación de programas para la tecnificación de riego.

El manejo de agua subterránea en el Valle de Silao-Romita, debe de llevarse a cabo dentro de un Plan Maestro que conjunte acciones relativas a la extracción de agua mediante pozos, al tipo y forma de cultivos, a su relación con otros sectores productivos y a las necesidades de la población rural, todo ello tomando en cuenta los diferentes aspectos sociales. Además, debe de ser sustentable, o sea que debe de corresponder a un manejo integral que no se agote con el tiempo y que arroje un beneficio.

No es recomendable la perforación de pozos nuevos que incrementen la sobreexplotación de los acuíferos. Sin embargo, los usuarios tienen derecho de llevar a cabo reposiciones de pozos nuevos cuando el antiguo queda inutilizado. En estos casos, es conveniente fomentar la reubicación de dichos pozos hacia zonas menos conflictivas geohidrológicamente, o sea hacia las estribaciones de los valles y hacia el oeste, donde los efectos de la sobreexplotación son menores, aliviando así el cono piezométrico fuerte que se ha formado en el centro del Valle de Silao.

En las zonas más conflictivas, los niveles de bombeo se ubican a gran profundidad y por lo tanto el costo de la energía eléctrica es alta. En estos sitios, se recomienda brindar facilidades a los

agricultores, siempre y cuando se establezcan desarrollos agropecuarios de alto rendimiento y bajo consumo de agua.

El agua subterránea del Valle de Silao-Romita, al igual que otros valles del Estado de Guanajuato, se encuentra explotada por arriba del límite deseable, lo cual está causando problemas que se agudizarán en el futuro cercano.

No existen áreas nuevas para la perforación y extracción de caudales adicionales, sin perjudicar al acuífero actualmente en explotación. Por otra parte, el crecimiento general existente demanda más agua. No existen volúmenes adicionales de agua subterránea que puedan ser extraídos sin causar efectos nocivos. Por el contrario, es necesario reducir la extracción actual. La solución planteada consiste en un Plan Maestro del uso del agua que involucre a todos los sectores y tendiente a utilizar el agua que se extrae actualmente pero en actividades prioritarias esto es, modificar el uso del agua de riego de bajo rendimiento a potable, riego de alto rendimiento y/o en el sector agroindustrial.

Conclusiones

Se identificaron 3 horizontes acuíferos, denominados: horizonte acuífero *somero*, horizonte acuífero *intermedio* y horizonte acuífero *profundo*. Los acuíferos *somero* e *intermedio* fueron sobreexplotados en los últimos 30 años y actualmente se encuentran prácticamente agotados. El principal acuífero actualmente en explotación es el denominado acuífero *profundo*. Hacia el poniente de la presa de La Gavia, el acuífero se encuentra en rocas riolíticas (zona de la Muralla y sus alrededores). En el Valle de Silao-Romita el acuífero se presenta en materiales granulares y en menor proporción en basaltos. El espesor del acuífero es de alrededor de 400 metros.

La recarga al subsuelo se lleva a cabo esencialmente por filtraciones de agua pluvial sobre las elevaciones topográficas, mientras que la descarga del acuífero es por bombeo.

Se encontraron y censaron 1984 aprovechamientos de agua subterránea, de los cuales 6 corresponden a manantiales, 281 a norias y los 1697 restantes a pozos. Del total de los aprovechamientos activos (1592), su distribución por usos es la siguiente: 1390 se utilizan en riego, 176 para agua potable, 15 en la industria y 11 en abrevadero.

La extracción de agua subterránea por bombeo asciende a 408.4 Mm³/año, para toda la zona estudiada y considerando a los 3 horizontes acuíferos. El balance de agua subterránea se realizó en la zona de valle y para el acuífero profundo, obteniéndose una recarga de 130.29 Mm³/año, una descarga de 305.4 Mm³/año, una infiltración de 141.80 y un cambio de almacenamiento negativo de 33.33 Mm³/año. El abatimiento *medio* anual varía entre 2 y 5 metros por año.

Los resultados isotópicos, indican que para la zona de La Muralla, hasta el estrechamiento de la presa de La Gavia, el acuífero riolítico recibe su recarga del noroeste. Su contenido isotópico del agua es diferente al resto de las áreas marcadas, de donde se deduce que el agua de las riolitas

e ignimbritas que se explota en La Muralla, es independiente a la recarga y almacenamiento del acuífero del Valle de Silao-Romita.

Recomendaciones Generales

Intensificar los programas de uso eficiente del agua.

En el renglón de riego, que es el más importante ya que la extracción del acuífero asciende al 93% del total, se recomienda:

- Continuar y acelerar los programas de aplicación de técnicas de riego y selección de cultivos para el ahorro de agua.
- Cambiar por cultivos que requieran menor cantidad de agua.
- Reutilizar las aguas residuales en riego e industria.
- Elaborar un estudio socioeconómico enfocado al cambio de actividad agrícola por agropecuaria e industrial, principalmente en las zonas centrales del valle donde la extracción ha ocasionado la formación de conos de abatimiento,
- Incrementar la recarga del acuífero mediante la construcción de diversas estructuras tales como presas, adaptación de antiguos cauces para provocar infiltración, etc. Aplicar programas de reforestación para fomentar la infiltración del agua de lluvia hacia los acuíferos.

La tecnificación del riego es un aspecto importante. Existen dos zonas de riego con características diferentes. La primera con una tecnología de alto nivel, fuertes inversiones y gran rendimiento. En contraste, se tiene a la agricultura de bajo rendimiento económico. Se recomienda procurar la sustitución de cultivos de bajo rendimiento económico y alto consumo de agua, que permitan fomentar un mayor ingreso entre los agricultores y una disminución en los volúmenes de extracción de agua del subsuelo.

En el renglón relativo al agua potable se recomienda:

- a) Atacar las fugas tanto domiciliarias como de conducción de agua.
- b) Aumentar y acelerar las políticas de uso eficiente del agua que incluyen campañas de cultura del agua, sustitución de muebles sanitarios y dispositivos ahorradores de agua, entre otros.

Recomendaciones Particulares

Al oriente del Valle de Silao-Romita se encuentra la Ciudad de Guanajuato, cuyo abastecimiento de agua se lleva a cabo en gran medida a través de pozos ubicados en la zona conocida como Puentecillas. En esta porción, el acuífero es complejo y heterogéneo, predominando conglomerados y tobas riolíticas de reducida permeabilidad. De los datos obtenidos se desprende que el acuífero de Puentecillas no está conectado con el de Silao. Los niveles

estáticos y dinámicos son muy variables de un pozo a otro. De manera similar, los resultados isotópicos indican heterogeneidad. Se concluye que el agua de los pozos de Puentecillas corresponde a varios horizontes aislados y a probables fracturas, que en su conjunto alimentan a los pozos con caudales y niveles muy variables. La parte topográficamente alta tiene bajo rendimiento. Hacia la presa de La Purísima las condiciones son favorables.

Se considera que el agua de Puentecillas podrá seguir siendo un apoyo importante al abastecimiento de la ciudad de Guanajuato, sin embargo, no es la solución para el futuro, por lo que las fuentes adicionales se deberán de obtener de otros sitios.

Se recomienda integrar un *Plan Maestro de Uso del Agua* para las ciudades de Silao y Guanajuato.

Por lo que se refiere al área de la General Motors, el subsuelo está constituido por materiales granulares de baja permeabilidad que en los primeros 250 metros, incluyen horizontes acuíferos de bajo rendimiento. A profundidad, el acuífero se empobrece. La extracción de agua subterránea en esta zona no podrá incrementarse de manera notable, por lo que su solución se deberá buscar hacia el oriente y suroriente.

La Ciudad de Silao requiere de mayores volúmenes de agua para el abastecimiento de la población. Hacia el sur y suroeste de la ciudad existe un acuífero profundo de alto rendimiento, sin embargo, actualmente ya es explotado por un gran número de pozos. Para su abastecimiento futuro se recomienda la integración de un *Plan Maestro de Uso del Agua Subterránea* en una zona al suroeste de Silao, mediante el cual se permute el uso actual del agua, de riego a potable y agroindustrial.

Agradecimientos

A la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento de Guanajuato por las facilidades brindadas, tanto para la realización del trabajo como para su divulgación.

Al señor Jaime Fabian López Saavedra por la elaboración de las ilustraciones.

Referencias

Anderson, M. P. and W. W. Woessner, (1996). *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic press, Inc. 381 p.

Domenico, Patrick A. and F.W. Schwartz, (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology, U.S.A.* John Wiley and Sons. 834 p.

Fetter, C. W. (1988). *Applied Hydrogeology*. New York, Macmillan Publishing Company, 592 p.

Fletcher G., Driscoll., ed. (1987). *Groundwater and Wells*. St. Paul, Minnesota. Johnson Division, 1089 p.

Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice hall, Inc. 604 p.

Mc Donald, Michel, (1984). *Development of a multi-aquifer well option for a modular ground-water flow model*. Proceedings of the conference on practical applications of groundwater models. August, 1984, pp. 786.796

Abstract

Several hydrogeologic activities were performed at the Silao-Romita Valley in Guanajuato, Mexico. The purpose of these activities was to determine the degree of groundwater exploitation. Three aquifers were found in the valley. The first is a shallow aquifer with a static water level between 4 and 6 meters deep. This aquifer is exploited by shallow wells and water extraction pits with depths varying between 10 and 20 meters. The second aquifer, denominated intermediate, was the most exploited in previous decades (1970-1980). The wells depths vary between 100 and 120 meters in this aquifer, and its static level between 30 and 50 meters. Presently, both, the shallow and the intermediate aquifers, are practically exhausted. The third aquifer, denominated deep aquifer, has static levels between 60 and 100 meters, and some wells exploiting this aquifer are more than 150 meters deep. Presently, the deep aquifer is the most exploited aquifer.

The aquifer is mainly comprised of granular materials, except towards La Muralla (west) where fractured rhyolitic rocks are found. A total of 1984 wells and water extraction pits exist in the area, pumping 408.4 millions of m³/year; of which 93% is used for agricultural purposes. A mathematical simulation model (Visual Modflow) was applied, containing the information of almost 2000 wells. Five layers were used in the simulation, and it was calibrated with a high degree of accuracy. Results from isotopic analyses showed that groundwater from La Muralla has a different origin than groundwater from the Silao-Romita Valley. It has been recommended to implement a program to change water use, from agricultural to potable. The intention of this measure is to solve the water supply problems in the cities of Silao and Guanajuato, without increasing exploitation.

Keywords: Groundwater, aquifer, piezometric surface, hydrogeology, transmissivity, isotopes, mathematical model.

Dirección Institucional de Autores
Juan Manuel Lesser, David González,
Raymundo Estrella
Río Guadalquivir 3, Col. Pathé
Querétaro 76020, Qro.
México
Tel y Fax: (4) 2233361
Email: lesserjuanm@infosel.net.mx

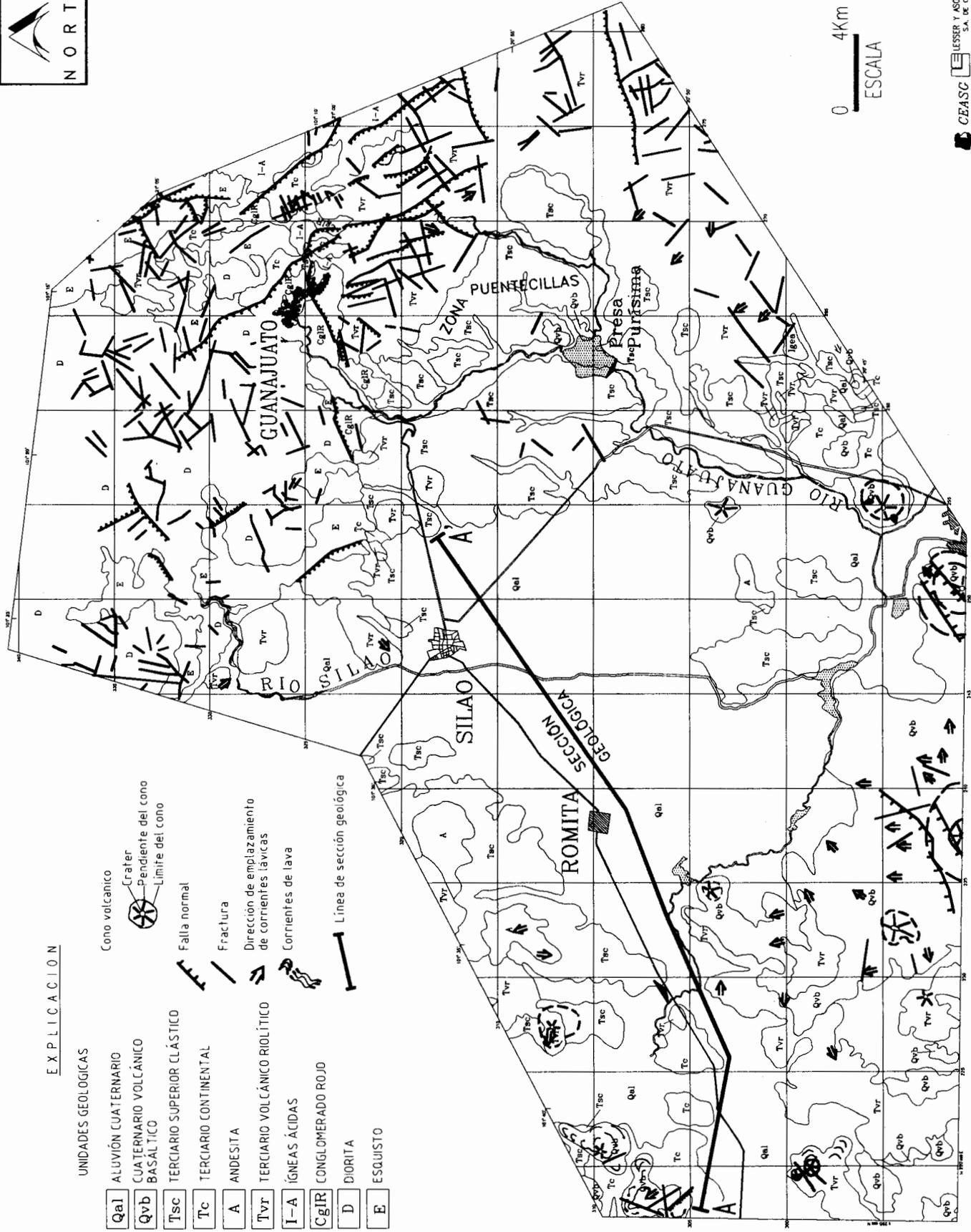


EXPLICACION

UNIDADES GEOLOGICAS

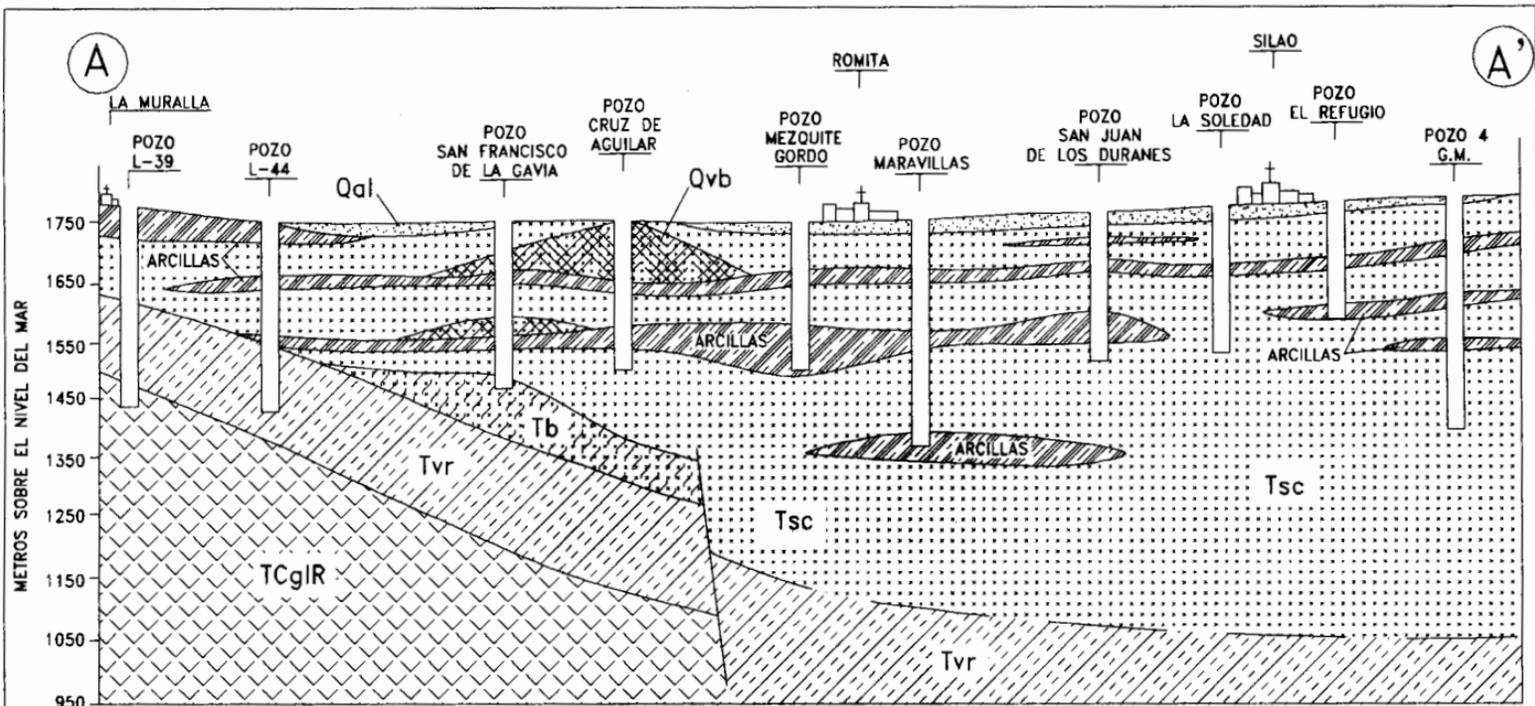
- Qal ALUVION CUATERNARIO
- Qvb CUATERNARIO VOLCANICO BASALTICO
- Tsc TERCARIO SUPERIOR CLASICO
- Tc TERCARIO CONTINENTAL
- A ANDESITA
- Tvr TERCARIO VOLCANICO RIOLITICO
- I-A IGNEAS ACIDAS
- CgIR CONGLOMERADO ROJO
- D DIORITA
- E ESQUISTO

- Cono volcanico
- Crater
- Pendiente del cono
- Limite del cono
- Falla normal
- Fractura
- Direccion de emplazamiento de corrientes lavicas
- Corrientes de lava
- Líneas de sección geológica



0 4Km
ESCALA

FIGURA 1.- PLANO GEOLOGICO



EXPLICACIÓN

Qal — Aluvi6n (Permeable)

Qvb — Basaltos (Permeables)

Tb — Basaltos (Generalmente permeables)

Tsc — Granulares y horizontes arcillosos

(Permeable en los granulares y de baja permeabilidad en los horizontes arcillosos)

Tvr — Ignimbritas y Tobas riol6ficas

(Permeabilidad secundaria)

TCgIR — Conglomerado rojo (Impermeable)

FIGURA 2.- SECCI6N GEOL6GICA ESQUEMÁTICA A-A' VALLE DE SILAO-ROMITA, GTO.

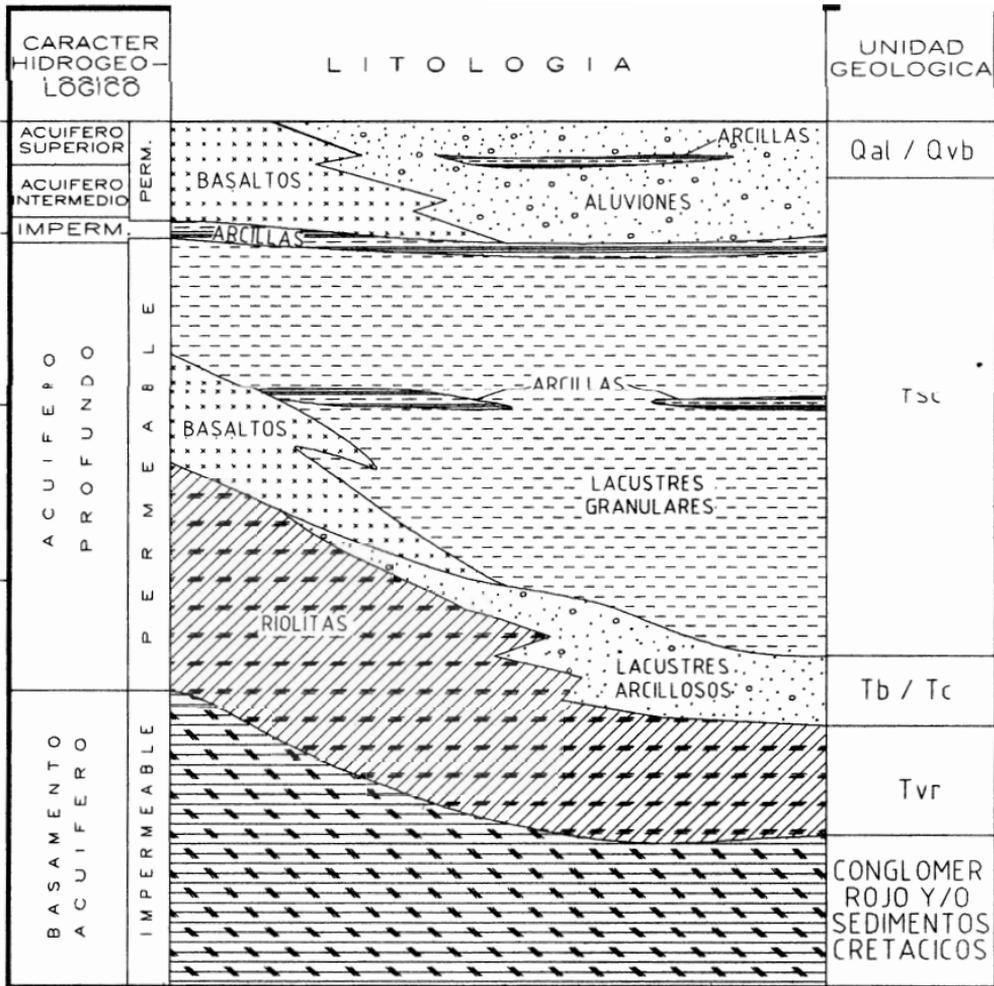
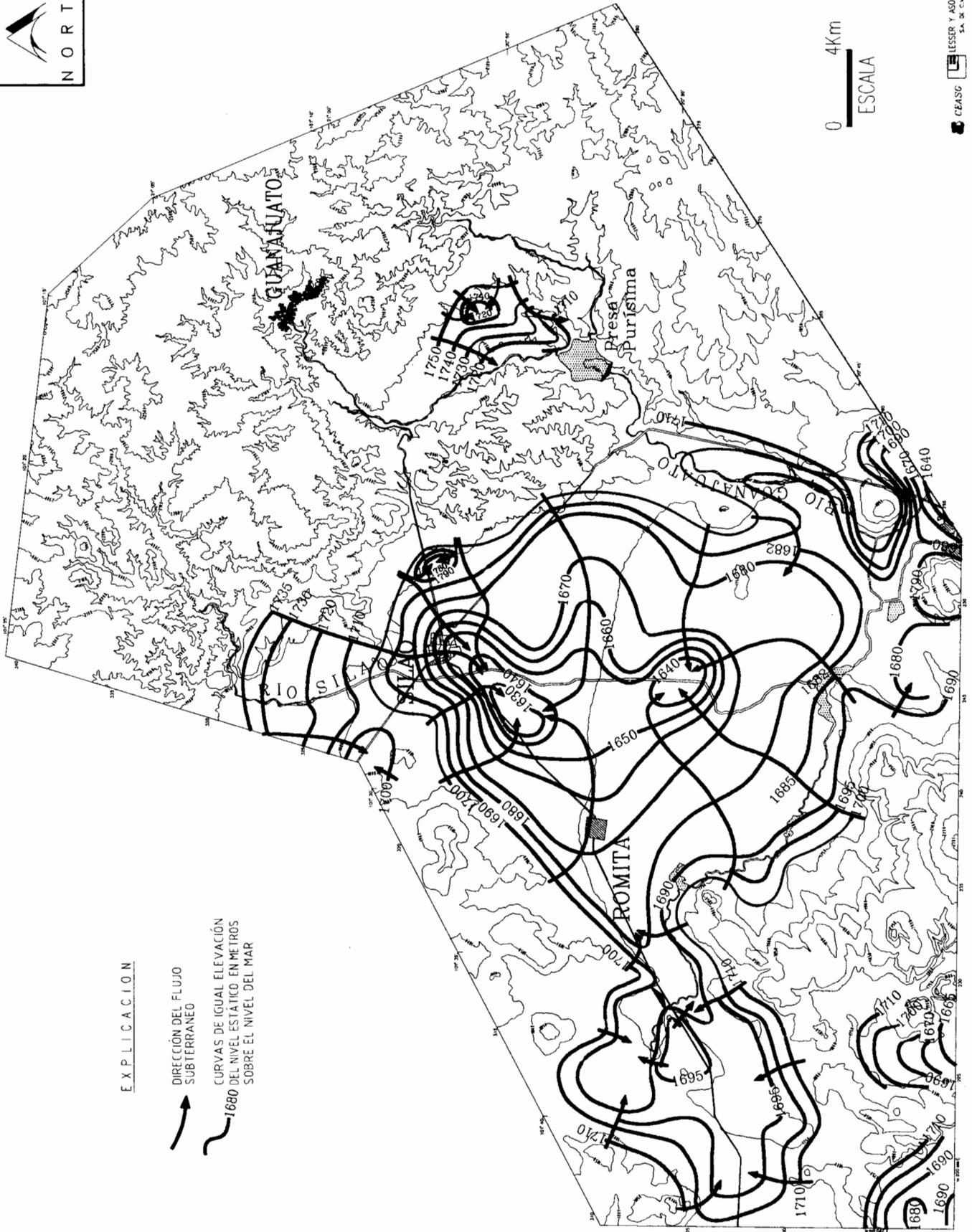


FIGURA 3.- COLUMNA HIDROGEOLOGICA



EXPLICACION

-  DIRECCION DEL FLUJO SUBTERRANEO
-  CURVAS DE IGUAL ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR

0 4Km
ESCALA

FIGURA 4. ELEVACION DEL NIVEL ESTATICO (1998) ACUIFERO PROFUNDO.

$\delta D \text{ ‰}$

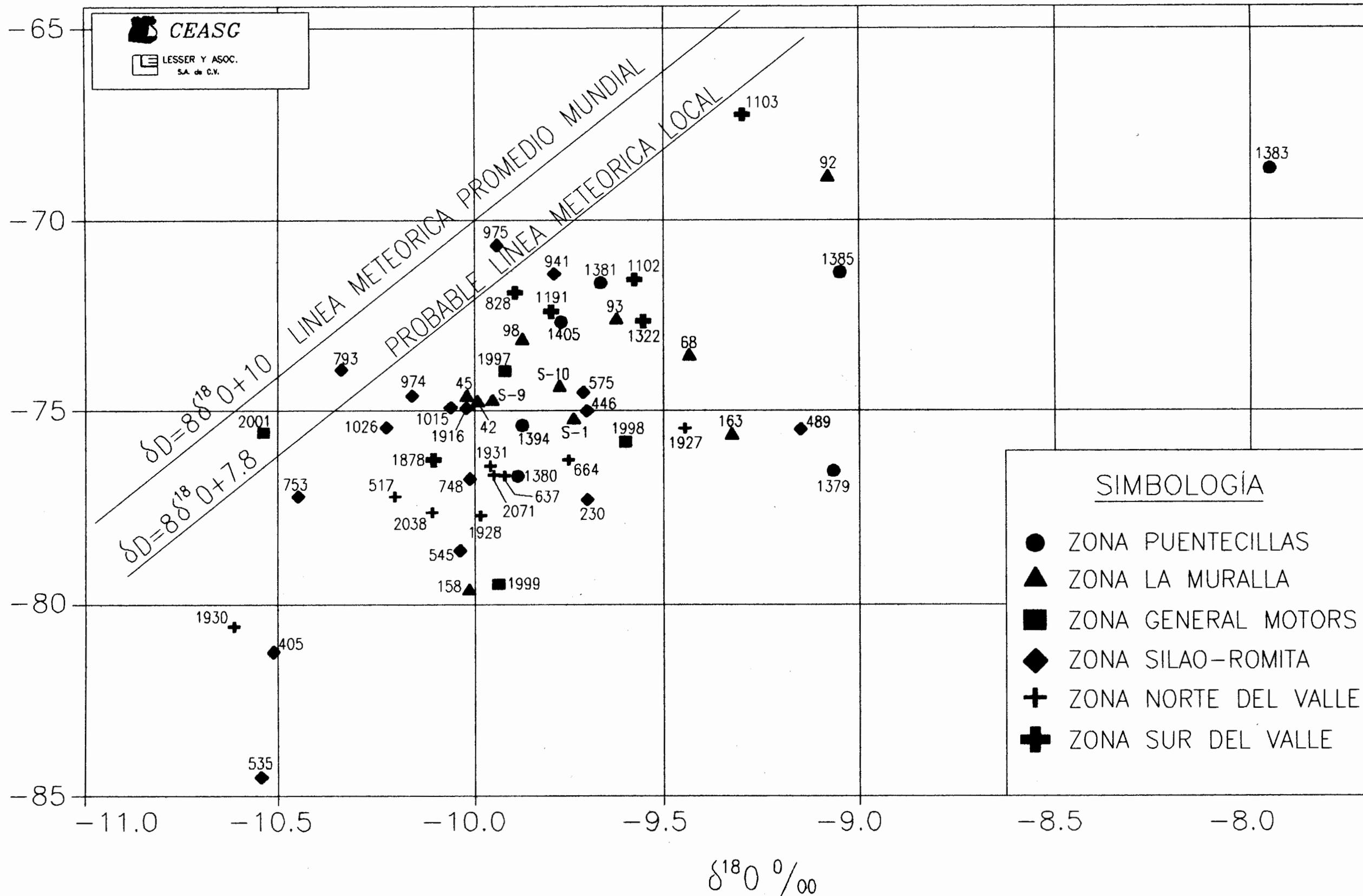


FIGURA 5.- GRAFICA DEUTERIO-OXIGENO 18 SILAO-ROMITA, GTO.

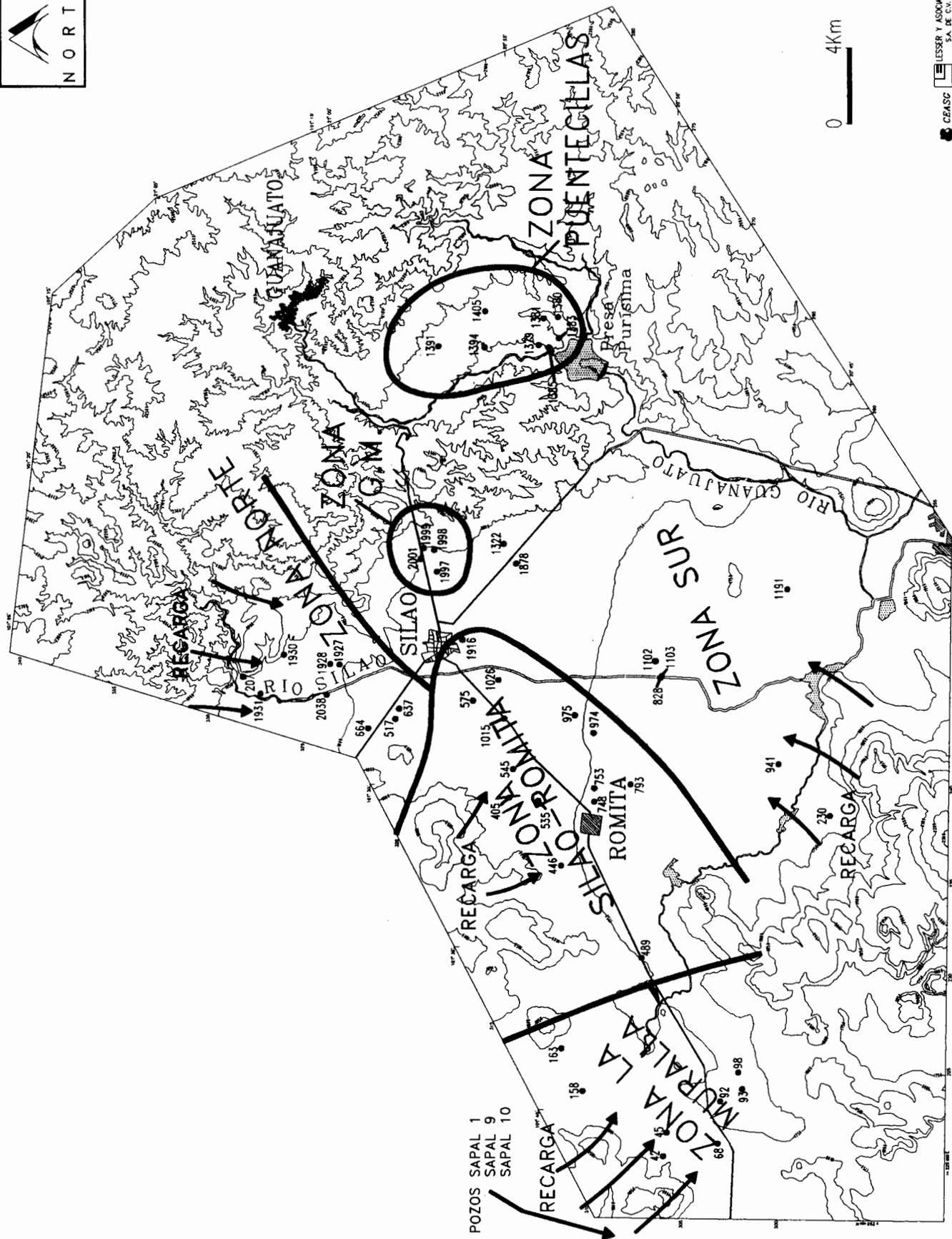


FIGURA 6.- ZONIFICACION GEOHIDROLOGICA BASADO EN RESULTADOS DE ISOTOPOS AMBIENTALES
LAS FLECHAS INDICAN LA PROCEDENCIA DE LA RECARGA

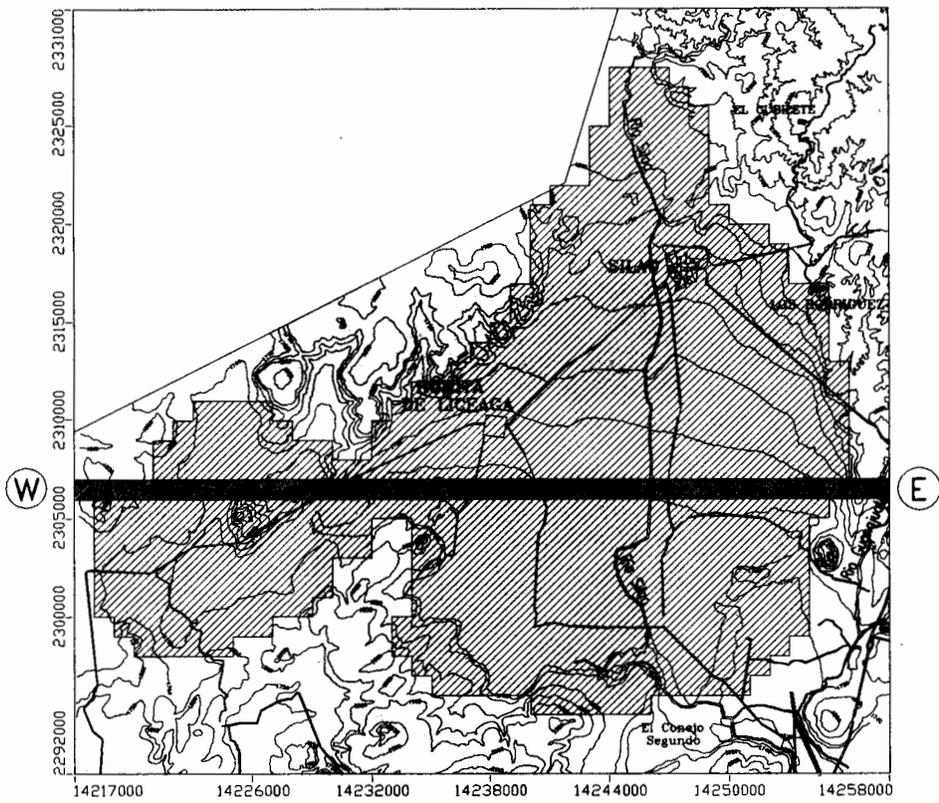


FIGURA 7.- AREA CUBIERTA POR EL MODELO

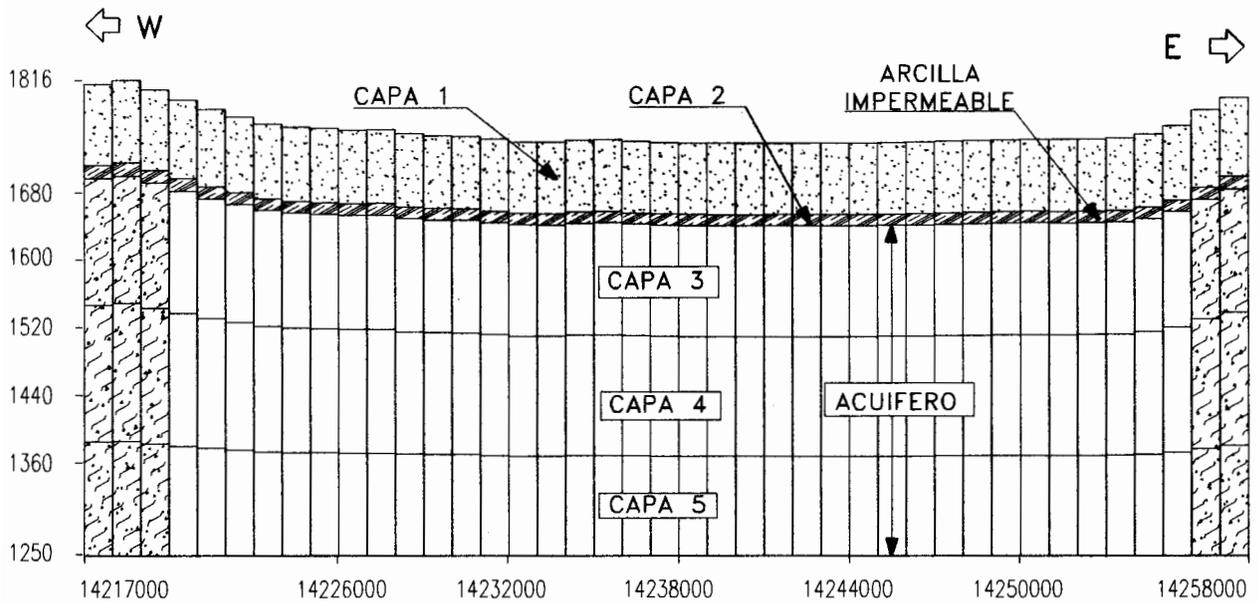


FIGURA 8.- SECCION ESTE-OESTE MOSTRANDO LAS CAPAS DEL MODELO

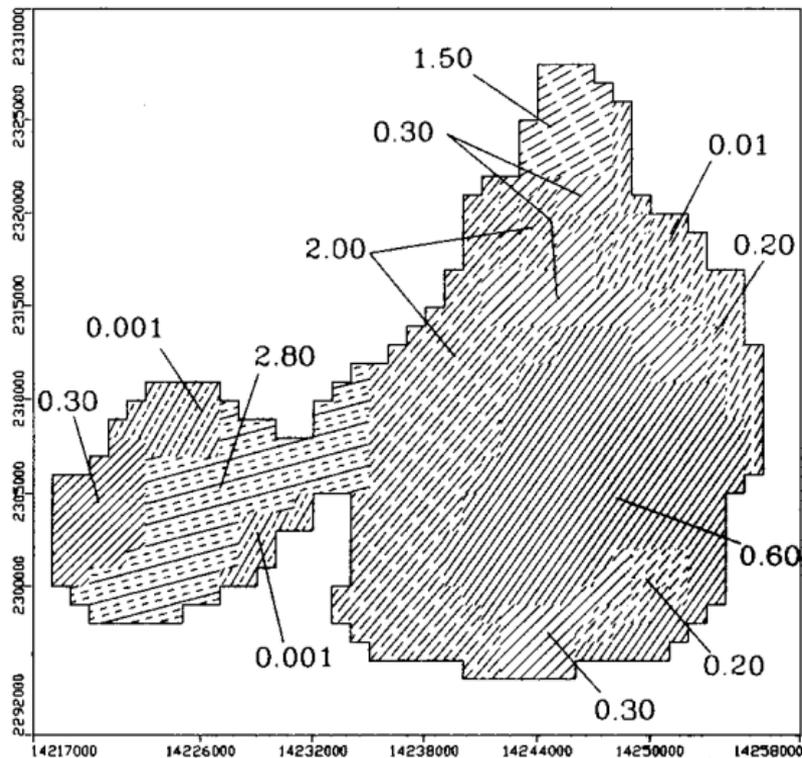


FIGURA 9.- PERMEABILIDAD DE LA CAPA 3
EN m / día

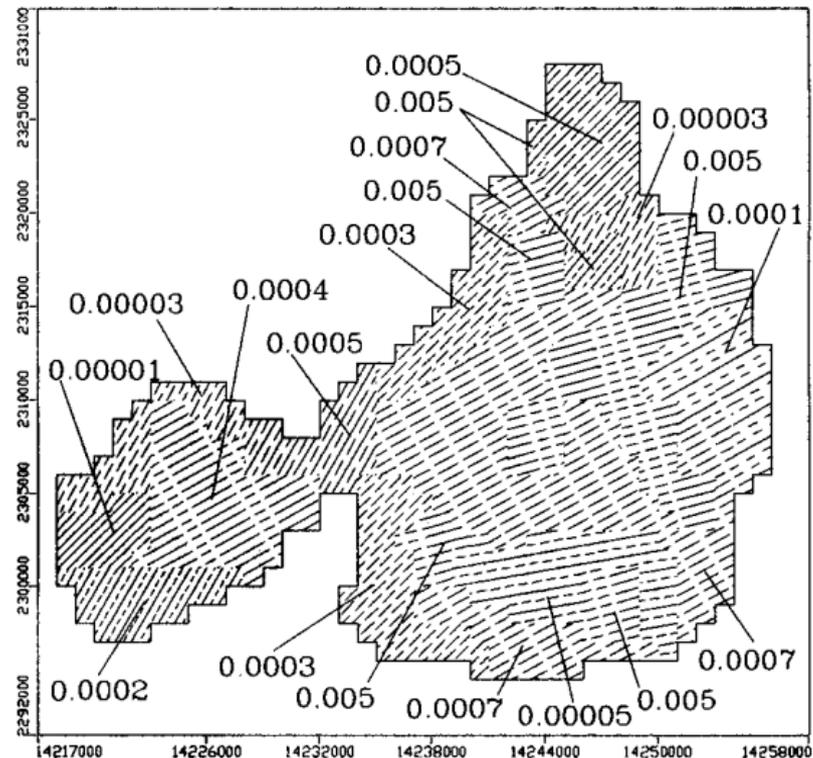


FIGURA 10.- COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
DE LA CAPA 3

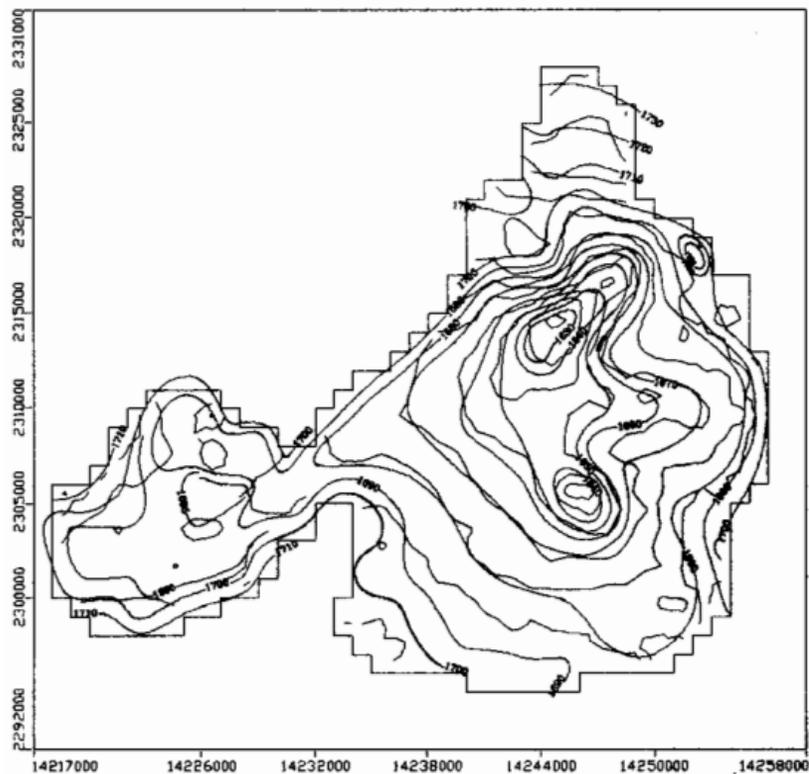


FIGURA 11.- COMPARACION DE VALORES FINALES
OBSERVADO-CALCULADO

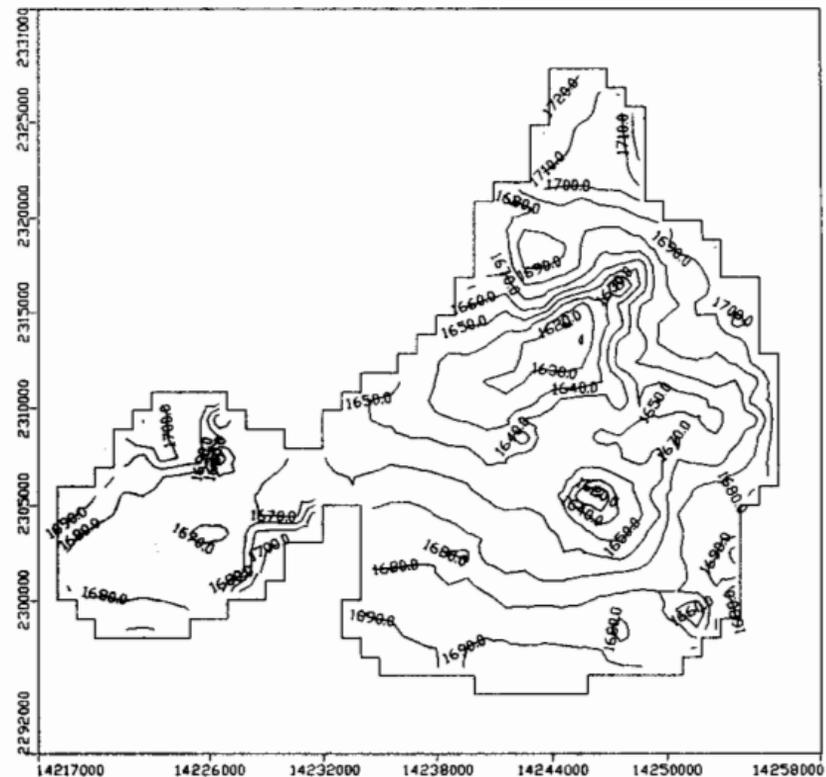


FIGURA 12.- PREDICCIÓN DE LA SUPERFICIE
PIEZOMETRICA



COMISION ESTATAL DE AGUA Y
SANEAMIENTO DE GUANAJUATO

Oficio No. DG-0847/99

Guanajuato, Gto. , a 18 de junio de 1999

ASUNTO: Autorización de Estudios Geohidrológicos

Ing. Juan Manuel Lesser Illades
Administrador Unico
Presente.

En relación con su oficio de fecha 16 de junio del presente año, donde nos solicita autorización para publicar los resultados de los Estudios Geohidrológicos de los Acuíferos de Silao - Romita y Pénjamo- Abasolo, le comunico nuestra conformidad e interés en que dicha difusión se lleve a cabo.

Unicamente le solicito hacer referencia a la participación de esta comisión a través de la Dirección de Estudios, en la ejecución y supervisión de los trabajos, así como establecer que los balances resultantes de los estudios no tendrán efectos en materia de administración del agua en tanto no sean publicados, en su caso, por la Comisión Nacional del Agua, según lo marca la normatividad respectiva.

Lo anterior, con objeto de evitar cualquier confusión en ese sentido.

Aprovecho la ocasión para enviarle un saludo afectuoso.

Atentamente.
"La Gran Alianza"

L.A.E. Vicente Guerrero Reynoso
Director General
"En Guanajuato... ¡todos por el agua!"

Copias: Ing. Ricardo Sandoval M. Director General de Planeación. Pte.
Ing. José Luis Cruz José. Director de Estudios. Presente
Minutario

