
VULNERABILIDAD ACUÍFERA Y PARAMETRIZACION GEOELECTRICA DEL SUBSUELO DE UNA EMPRESA PROCESADORA DE COBRE EN MÉXICO.

SILVA GARCÍA, J.T. ¹; RAMOS LEAL, J.A.²; RODRÍGUEZ CASTILLO R.²;
OCHOA ESTRADA S.¹ y MONDRAGÓN GUZMÁN R.³

¹CIIDIR-IPN-Michoacán. COFAA

²UNAM-Instituto de Geofísica

³ESIA-Ticomán-IPN

RESUMEN

Se evalúa el actual proceso de contaminación del acuífero somero por la posible infiltración al mismo de sustancias químicas con predominancia de cobre. Se aplicó el método de prospección geoelectrica, la obtención del índice de vulnerabilidad acuifera AVI, asociando dichos conceptos al esquema distributivo de la pluma contaminante detectada, usando como indicadores las concentraciones de Cu, Fe, Sb, Ni, As, y Zn. La prospección geofísica somera (AB= 90 m) permitió definir el panorama electroestratigráfico hasta una profundidad de 20m, delimitando cuerpos arcillosos con presencia de electrolito y horizontes arenosos interdigitados a la profundidades de 10 metros. Los distintos planos de isoresistividad aparente diferenciaron bajos resistivos inferiores a 1.0 ohms-m, correlacionables con estratos altamente saturados de electrolito, y sitios con resistividades de hasta 20 ohms-m, que coinciden con áreas de menor concentración de los contaminantes. Si a las características de vulnerabilidad obtenidas agregamos los tiempos de actividad (mas de 50 años) y la carga contaminante, podemos explicar las altas concentraciones detectadas en los pozos de observación. Los esquemas de evolución obtenidos para los distintos elementos químicos manejados, definen el régimen de desarrollo de la pluma contaminante. Las altas concentraciones pudieran deberse a efectos de acumulación mas que a incorporaciones continuas.

PALABRAS CLAVE: Vulnerabilidad acuifera, AVI, Cobre.

INTRODUCCIÓN

La zona de estudio se localiza al norte de la ciudad de México, ocupando una extensión de 35,117 m². la empresa cuyo proceso industrial principal es el de purificar lingotes de cobre con concentraciones del orden del 95 %, hasta llevarlos a un 99.9 %.

METODOLOGÍA

Se basó principalmente en: análisis y evaluación del marco geológico regional y local, prospección geofísica utilizando la técnica de sondeo eléctrico vertical y la aplicación del método AVI (**A**cuífer **V**ulnerability **I**ndex) de vulnerabilidad acuífera. Para la realización de la distribución de los distintos esquemas de isoconcentraciones se utilizaron interpoladores lineales tipo Kriging.

GEOLOGÍA REGIONAL Y LOCAL

El drenaje natural de la Cuenca de México interrumpido desde la región de la Sierra de Pachuca hacia la cuenca hidrográfica del Río Amacuzac en el sur, propició la formación de un lago al norte de la Sierra de Chichinautzin (Mooser, 1962, 1975). El cierre del valle da origen al relleno de material fluvio-lacustre de la cuenca. Dado que el relleno cubrió discordantemente un terreno de topografía fuertemente disectada, se tiene una variación lateral en espesores y en general aumentan de norte a sur. El relleno es formado por material volcánico re trabajado, interestratificado con tobas interdigitadas con depósitos lacustres en la parte central de la cuenca. Debido a la escala de trabajo solo se describirán las unidades involucradas en el área de estudio, tomando en consideración la sección estratigráfica mostrada en la figura 1.

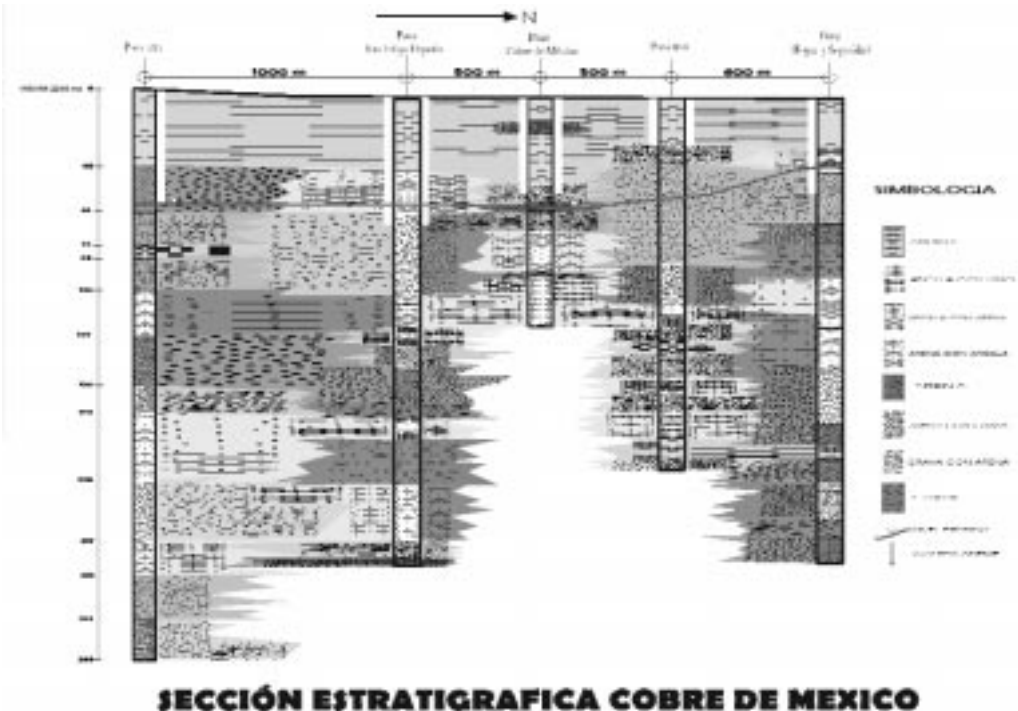


Figura 1. Sección estratigráfica del área de influencia de la zona de estudio.

Depositos lacustres (Q1a). Regionalmente comprende sedimentos clásticos y productos piroclásticos asociados con la actividad volcánica del Popocatepetl y Sierra del Chichinautzin, esta unidad fue cortada por los pozos Roma-1, Mixhuca-1, Tulyehualco y Texcoco en espesores de 30 a 300 m adelgazándose hacia las márgenes. La edad de ésta unidad obtenida por el método de Carbono 14 (Bradbury, 1971) varía de 4, 800 – 46, 000 años que comprende los periodos de Pleistoceno Tardío al Holoceno. Para nuestra área de interés, se identifica con espesores de hasta 45 m, compuesto principalmente por arcillas.

Depósitos aluviales (Qal).- Están constituidos por material clástico fluvial contemporáneo a depósitos lacustres que se encuentran rellenando amplios valles y estructuras como la de Chalco y Cd. de México. El material es formado por gravas, arenas, limos y arcillas. En ésta unidad se han reportado espesores de hasta 500 m. Como se observa en la sección geológica antes mencionada, esta unidad presenta variaciones laterales de importancia en distancias relativamente cortas, lo que demuestra su heterogeneidad lateral puesta de manifiesto en el trabajo de geofísica realizado y que se describe mas adelante.

AMBITO GEOHIDROLÓGICO

Dada la distribución espacial y posición estratigráfica así como las características geohidrológicas de conductividad hidráulica de las unidades, éstas han sido divididas como:

- *Acuitardo Superior, Acuífero Principal (Acuífero Superior), Acuitardo Inferior, Acuífero Inferior.*

De acuerdo a la información geoelectrica y cortes de pozos cercanos al predio en cuestión el presente estudio solo contempla las dos primeras unidades.

– *Acuitardo Superior.*- Formado por arcillas altamente compresibles, que hacia las márgenes de las planicies se intercalan con limos, arenas y en ocasiones gravas. Los espesores en la ciudad de México varían entre 20 y 60 m. La conductividad hidráulica para el acuitardo superior varía entre $1.5 \text{ E } -6$ y $5 \text{ E } -9$ m/s. En el interior de las planicies a profundidades entre 35 y 55 m se han identificado 2 capas permeables compuestas de cenizas volcánicas tamaño limo y arena, con espesores de 2 m, en el ámbito geotécnico se les conoce como capas duras Marsal y Mazari (op. cit.). Esta unidad corresponde con el paquete arcilloso superior identificado en la sección geológica, con espesor máximo de 45m.

– *Acuífero Superior.*- Está constituido por sedimentos fluvio-lacustres del Cuaternario, rocas basálticas del Cuaternario, rocas andesíticas y depósitos piroclásticos del plio-cuaternario, depósitos aluviales del Plioceno Superior. La profundidad de su base varia entre 400 y 750 m;. Este es el acuífero principal de la cuenca donde se extrae un volumen aproximado de 46 m³/s (Herrera et al., 1994). En depósitos piroclásticos se reportan conductividades del orden de $3.6 \text{ E } -6$ a $2.1 \text{ E } -5$ m/s, en depósitos fluvio-

lacustres de 4.9×10^{-6} a 1.7×10^{-4} m/s y en medios fracturados para rocas volcánicas se tienen transmisividades de 8.6×10^{-5} a 0.14 m²/s (Herrera et al., 1994, Vázquez, 1995). En nuestro caso, dicha el acuífero superior esta representado por todo el material que subyace al paquete arcilloso como se observa en la siguiente sección.

Haciendo referencia a la dirección de flujo que corresponde al sitio de interés y tomando como base información proveniente de pozos de monitoreo con profundidades de 3 m, existentes dentro de la empresa en cuestión, se identifico un acuífero "colgado", cuyas profundidades van de 0.8 m a 2.9 m; como se observa en la figura 2, se definen dos zonas piezometricas, una localizada en la porción sur produciendo direcciones locales hacia el norte y el sur y otra definida como un bajo piezométrico en la parte norte.

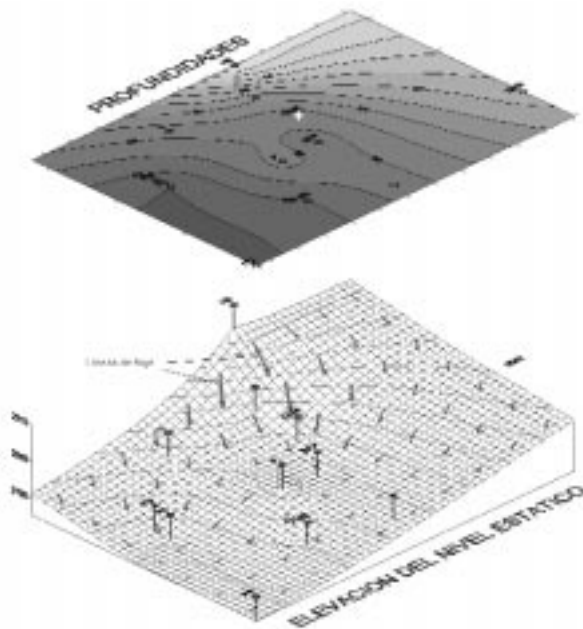


Figura 2. Profundidad y elevación del nivel estático del área de estudio.

En términos de calidad química del agua, un muestreo realizado en febrero del 2000, se encontraron altas concentraciones de Cobre y Sulfatos en el pozo profundo que abastece actualmente a la planta. Este muestreo se realizó a intervalos de 1,5,15,30, 60, 90 y 120 minutos con el pozo en reposo durante 12 hrs.. Para el caso del cobre, se observan para los primeros minutos de bombeo concentraciones de 104.4 mg/l, pasando paulatinamente en un rango de dos horas a estabilizarse en concentraciones de 80 mg/l; para el caso de sulfatos la concentración máxima al inicio del bombeo fue de 452 mg/l y se estabilizo en 344 mg/l en ese mismo lapso de tiempo.

PROSPECCIÓN GEOFISICA

Esta etapa de trabajo tuvo como objetivo principal, caracterizar geoelectricamente el subsuelo del predio que nos ocupa, buscando zonas anómalas que pudiesen asociarse a un proceso de alteración del material *in situ* producto de lixiviados generados en el proceso industrial. En la medición de la resistividad eléctrica se utilizó la técnica de sondeo eléctrico vertical y para calibrar la interpretación se generó un sondeo sintético con la estratigrafía del pozo de la empresa. Con los datos obtenidos se elaboraron los correspondientes perfiles geoelectricos, así como planos de isorresistividades aparentes; con lo cual se pudieron señalar variaciones resistivas del subsuelo tanto vertical como horizontalmente correlacionando dicha información con alguna anomalía.

En total se realizaron 9 SEV'S, distribuidos en tres secciones geofísicas, las distancias AB (de emisión de corriente) utilizadas variaron de un máximo de 90 m hasta un mínimo de 20 m, según las circunstancias que se presentaron en cada caso, siempre con arreglo electródico Schlumberger y espaciamientos entre centros simétricos. La interpretación de los SEV's permitió la estructuración de secciones electro-estratigráficas que consideraron no solo la interpretación sino también el marco geológico local. Las representaciones en planta de la resistividad aparente permiten correlacionar tendencias de mínimo con la presencia, en este caso de electrolitos.(Figura 3. sección 1 y 2).

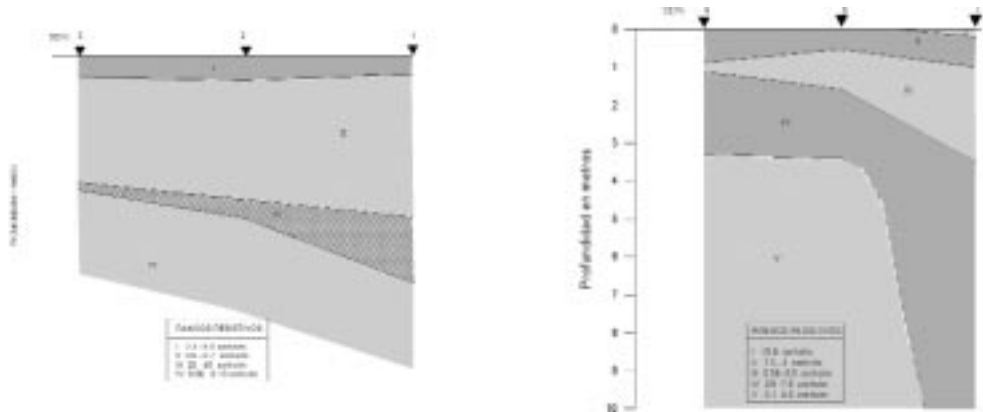


Figura 3. Secciones electro estratigráficas obtenidas en el sitio de interés.

Las seudo secciones eléctricas permitieron conocer cual es la distribución de resistividades aparentes a diferentes profundidades. En la figura 4, se observan las configuraciones obtenidas en cuatro planos de profundidad siendo estos a 1.5, 2, 3 y 5 metros: en la primera, se define con claridad un comportamiento resistivo que define la presencia de un lente anómalo (bajo resistivo) del orden de 0.6 ohms-m, localizado entre los pozos de monitoreo 6 y 17, proyectando una forma elipsoidal alargada en dirección NW-SE, es decir hacia el pozo de monitoreo 7, con valores resistivos máximos de 2.8 ohms-m; esta misma

situación se prevalece a los 2 y 3 metros de profundidad observándose claramente este esquema concéntrico del bajo resistivo, con rangos del orden de 0.5 y 0.8 ohms-m, pudiendo asociar dicho esquema a la posible dirección de la pluma contaminante. Así, es posible predecir que los bajos resistivos pueden ser correlacionables con las zonas de mayor concentración del electrolito contaminante, y la variación resistiva visualizada en planta se correspondería con el esquema de distribución del patrón de concentración del electrolito.

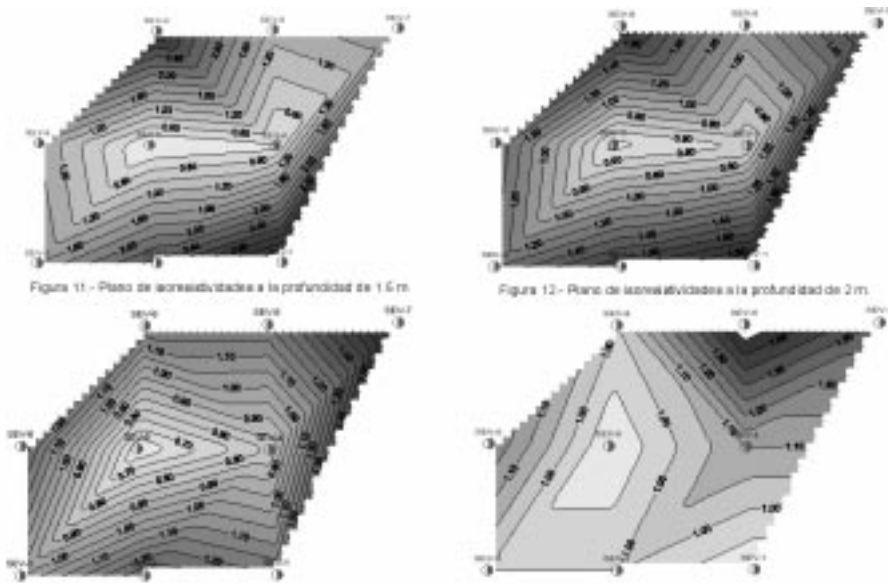


Figura 4. Planos de isoresistividades a 1.5, 2, 3 y 5 metros de profundidad.

Indice de vulnerabilidad acuifera (AVI)

El AVI es uno de los métodos más sencillos, fáciles y rápidos de cuantificar la vulnerabilidad, tan solo utiliza la conductividad hidráulica y el espesor de las capas de diferente material que se encuentran sobre el nivel del agua.

Se utilizaron los datos de profundidad de los pozos de monitoreo de Septiembre de 1998, el valor mínimo (0.79 m) se encontró en el pozo M-12, el valor mas alto (3.33 m) se localiza en el pozo M-11, la media de profundidades es de 1.7 m. Debido al rango de profundidades se uso los valores de Conductividad Hidráulica en los muestreos de suelo a un metro de profundidad. Los valores de vulnerabilidad por días se observan en la figura 5, pudiéndose distinguir tres rangos de importancia; el primero de ellos con valores de 1 a 2, localizado hacia la porción sur de la planta coincidiendo con las áreas de entrada de camiones, proyectándose uniformemente hacia los patios de maniobras; un segundo rango intermedio, con valores de 2 a 4, se visualiza para aquella área donde se localiza el actual pozo de abastecimiento de agua de la planta, finalmente el rango de menor

vulnerabilidad detectado fue de 4 a 6 días bien definido hacia la porción norte de la planta. La validación del plano de vulnerabilidad para el acuífero colgado resultó más fácil debido a que se contaba con información de compuestos químicos en los diferentes pozos de monitoreo. Como se verá más tarde las zonas de mayor vulnerabilidad presentan los valores más altos de concentración.

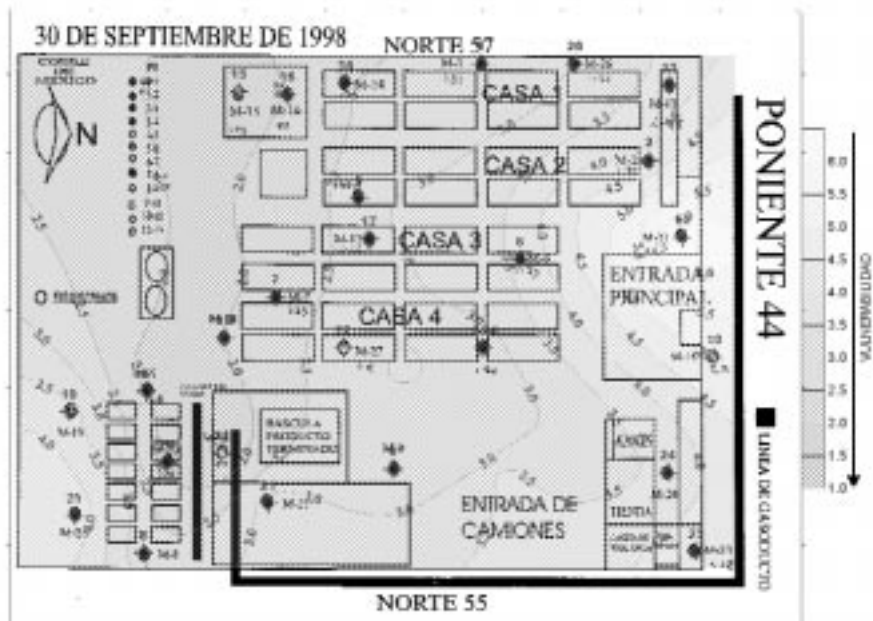


Figura 5. Índice de vulnerabilidad acuifera (AVI) en días.

PLUMA CONTAMINANTE

Los procesos que afectan el transporte y destino de un soluto en el subsuelo pueden ser divididos en categorías de físicas, químicas y biológicas, como son advección, dispersión, difusión, retardo, reacciones redox, reacciones ácido-base.

En los materiales del subsuelo los poros varían en tamaño y orientación, estas características junto con la distribución de los poros modifica las velocidades y distribución de cualquier partícula que circula a través de ellos. Este proceso produce que una sustancia disuelta en agua se propague gradualmente para ocupar una porción más grande cada vez del campo de flujo, cuando entra al sistema acuífero. Este fenómeno de mezcla se conoce como dispersión. La pluma contaminante ha sido delimitada en planta, no así en perfil debido a que no se cuenta con muestreos verticales en los diferentes pozos de monitoreo. Para darnos una idea de la forma de la pluma contaminante dentro de la planta se utilizó la distribución de conductividad eléctrica en agua.

Esquemas de evolución de la pluma contaminante

Tomando como base los datos químicos del monitoreo realizado por Azteca S. A. de C.V. (inédito), para los meses de Abril, Mayo y Septiembre de 1998, fue posible generar los esquemas de evolución del comportamiento de la pluma contaminante, su orientación y dispersión preferencial. Los elementos considerados fueron: Cobre, Arsénico, Antimonio, Zinc, Hierro y Níquel.

En la figura 6-a, se muestran planos de contornos de isoconcentraciones de Cobre, los valores más altos se encuentran en la casa 1 (42 g/l), la cual esta actuando como la principal fuente contaminante para la mayor parte de los parámetros medidos, con excepción del antimonio. Dentro de la planta los valores más bajos (trazas) se localizan hacia la casa 5 y salida de camiones. En los meses de Abril y Mayo se observan dos zonas de dos fuentes con mayor concentración y para el mes de Septiembre solo se presenta una sola fuente con mayor concentración.

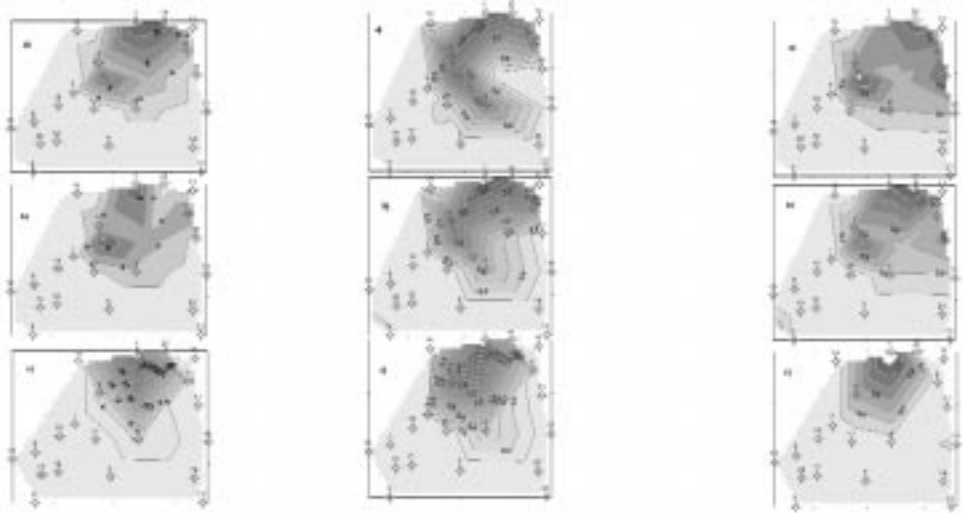
El Hierro tiene sus mayores concentraciones hacia la casa 1 (1.5 gr/l) y los valores más bajos se encuentran hacia la entrada de camiones y casa 5. El comportamiento de esta pluma difiere de la de Cobre, los valores altos están más distribuidos dando localmente la forma de una fuente lineal continua durante los meses de Abril y Mayo y para Septiembre las concentraciones se han dispersado, dando la forma de una fuente puntual. Los índices más altos se reportan en el mes de mayo (Figura 6-b).

En relación al Níquel, valores altos se reportan hacia la casa 1 (1.5 gr/l), y los valores más bajos se tienen hacia la casa 5 y entrada de camiones (0.001 gr/l). Durante los meses de Abril y Mayo se observan dos fuentes y para Septiembre solo se presenta una fuente. Los valores mayores se registran en Mayo (Figura 6-c).

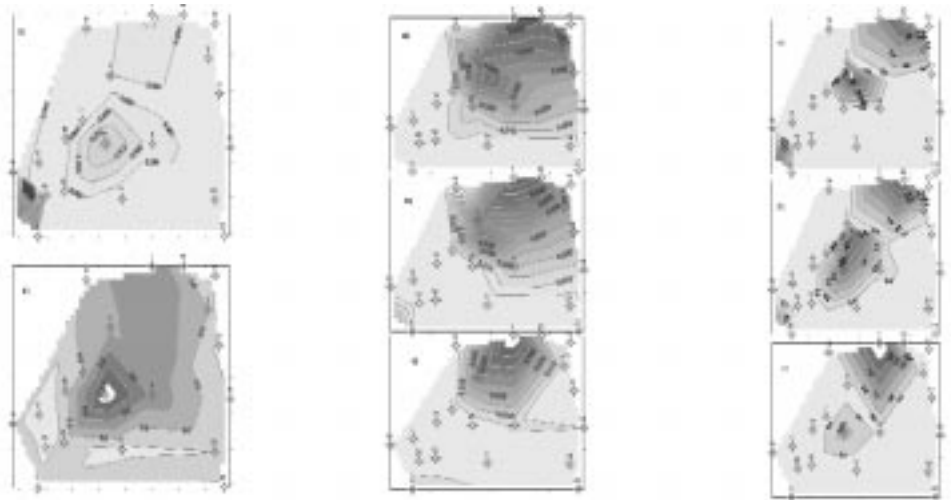
El Antimonio es el único contaminante que sale del patrón de la pluma del resto de los contaminantes. La zona de mayor concentración (0.032 gr/l) se da en la casa 4 y los valores disminuyen gradualmente en todas direcciones, los valores más bajos reportados en Septiembre de 1998 son del orden de 0.006 gr/l. No se cuentan con valores para el mes de Abril, sin embargo para el mes de mayo los valores se reporta valores muy altos en extremo SE de las instalaciones, sin embargo esta anomalía no se observa para el mes de Septiembre (Figura 6-d).

En cuanto al Zinc, se identifican dos fuentes para los meses de Abril y Mayo en la casa 1 y 3, sin embargo para el mes de Septiembre solo se conserva una fuente en la casa 1, Los valores mas altos se registran en el mes de Mayo (Figura 6-e).

Durante los meses de Abril y Mayo, para el Arsénico se identifican tres posibles fuentes puntuales, localizadas en casa 1, casa 2 y extremo SE de la empresa. Para el mes de Septiembre se presenta dos posibles fuentes en casa 1 y casa 2 (Figura 6-f). Los valores máximos se registran en casa 2 en el mes de Mayo.



Figuras 6-a, b, c, referidas al Cobre, Hierro y Níquel respectivamente



Figuras 6- d, e, f, referidas al Antimonio, Zinc y Arsénico respectivamente.

CONCLUSIONES

Las dos principales unidades litológicas diferenciadas en la zona de estudio se corresponden en su parte superior con arcillas lacustres e infrayaciendo a estas, cuerpos arenosos con intercalaciones de limos y gravas, según se desprende de la sección geológica definida para el lugar.

El trabajo de prospección geofísica somera permitió definir el panorama electrostratigráfico para la zona de interés, delimitando los cuerpos arcillosos con presencia de electrolito y horizontes arenosos interdigitados a profundidades del orden de 10 metros.

Los planos de isorresistividad aparente para distintas profundidades han podido diferenciar bajos resistivos inferiores a 1.0 ohms-m, correlacionables con estratos altamente saturados de electrolito, lo cual explicaría la inusual conductividad eléctrica, así como zonas de valores máximos que se coinciden con zonas de menor concentración de los contaminantes.

El esquema hidrológico define con claridad la presencia para los primeros 40m, del acuitardo superior y subyaciéndole el acuífero superior de características granulares del tipo de gravas y arenas.

Los esquemas de evolución obtenidos para los distintos elementos químicos manejados, definen el régimen de desarrollo de la pluma contaminante cuya dirección preferencial es hacia el noroeste. Las altas concentraciones pudieran deberse a efectos de acumulación mas que ha incorporaciones continuas.

Aunque por lo somero del nivel piezométrico del acuitardo superior toda la zona se puede considerar como vulnerable, fue posible definir tres distintos grados de vulnerabilidad acuífera AVI, estando en la zona intermedia con rangos de 2 a 4 días el pozo actualmente en explotación. Si a las características de vulnerabilidad obtenidas agregamos los tiempos de actividad, mas de 50 años y la carga contaminante, se explican las altas concentraciones detectadas en los pozos de observación.

Del comportamiento de las plumas contaminantes, se desprenden dos hipótesis, la primera es que se trate de una fuente intermitente con migración de la pluma hacia el extremo SE de las instalaciones y la segunda hipótesis es que se trate de dos o tres fuentes alineadas con orientación NW-SE, en donde la fuente en casa 1 es continua y la fuente en casa tres sea intermitente.

BIBLIOGRAFÍA

- ASTECA, S.A. de C.V., 1998; Reportes mensuales de concentraciones de metales pesados en pozos de monitoreo de Cobre de México" (inédito).
- Bradbury, J.P., 1971; Palimnology of Lake Texcoco, Mexico. Evidence from diatoms. *Limnol. Oceanogr.*, 16, 180-200.
- Herrera, I., Medina, R., Carrillo, J. y Vázquez E., 1994; Diagnostico del estado presente de las aguas subterráneas de la ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras, DGCOH, DDF, Rep. Tec. Contrato 3-33-1-0689, (2 tomos) UNAM, Instituto de Geofísica, 1994.
- Marsal R.J. y Mazari, M., 1969; El Subsuelo de la Ciudad de México, México, D. F., UNAM, Fac. Ing., p 377.

- Mooser, F., 1962; Bosquejo Geológico del Extremo sur de la Cuenca de México. México, D.F., Congreso Geológico Internacional., 20, Libro - guía de la Excursión C-9, p. 9-16.
- Mooser, F., 1975; Historia Geológica de la Cuenca de México. En Memorias de las Obras del Sistema de Drenaje Profundo del Distrito Federal. México, D.F., DDF, T., 1, 7-38.
- Vázquez - S. E., 1995; Modelo Conceptual hidrogeológico y Características Hidráulicas del Acuífero en Explotación en la Parte meridional de la Cuenca de México. Tesis de Grado, Maestría en Aguas Subterráneas, Posgrado en Geofísica, CCH - UACPyP, UNAM. México.