
Estudio geoelectrico e hidroquímico para mapear la pluma de lixiviados derivados de un basurero a cielo abierto en Mexicaltzingo, Estado de México.

L. R. Reyes-Gutiérrez^{1*}, M. L. Vázquez-Castro¹, S. Pedroza-Benítez¹, G. Gómez-Beltrán¹ y M. G. Macedo-Miranda²

¹Universidad Tecnológica del Valle de Toluca, Área de Tecnología Ambiental. Carretera del DF. Km 7.5 Colonia Santa María Atarasquillo, Lerma, Edo de México. CP 52050. Tel: (01) 728 28 59 969 ext. 222.

²Instituto Tecnológico de Toluca, Área de Ciencias Ambientales. Ave Tecnológico s/n Fraccionamiento la Virgen, Metepec. Edo. de México. CP 52149. Tel. (01) 722 208 7200.

Geoelect and hydrochemical study for mape the plume leachate derived of a landfill opened up in Mexicaltzingo, State of Mexico.

Abstract

This study describes the quality of the groundwater in the dump to open pit, a dump of the municipality Mexicaltzingo located in the State of Mexico. Three geoelectrics lines using method of electrical resistivity image were realized. Also hydrochemical and hydrogeological studies were realized in the site. The site has six piezometers to a depth of 30 m, upstream, downstream and within the landfill to monitor the quality of water and measure the static level. Piezometers were named as PZ1, PZ2, PZ3, PZ4, PZ5 and PZ6. The distribution of total dissolved solids (STD) at the site was measured. The aquifer is unconfined type. The top of the aquifer is covered by a surface layer dry and underlying by Upper Toluca formation. Total solids dissolved (STD), represented by the ions Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ and NO₃⁻ were estimated to be greater than 4000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ at a depth of 12 meters in the area of geoelectrical study lines. Found the ground water is not suitable for use domestically in this area.

Key words: resistivity, lixiviate, piezometers, contaminant plume.

Resumen

Este estudio describe la calidad del agua subterránea en el Tiradero a Cielo Abierto, un basurero del municipio de Mexicaltzingo ubicado en el Estado de México. Se realizaron 3 líneas geoelectricas mediante el método de imagen de resistividad eléctrica. También se realizaron estudios hidrogeológicos e hidroquímicos en el sitio. Se cuenta con seis piezómetros a una profundidad de 30 m corriente arriba, corriente abajo y dentro del mismo basurero para el monitoreo de la calidad del agua y medición del nivel piezométrico. Los piezómetros se nombraron como PZ1, PZ2, PZ3, PZ4, PZ5 y PZ6. Se midió la distribución de sólidos totales disueltos (STD) en el sitio. El acuífero es de tipo libre. El techo del acuífero está cubierto por una capa superficial seca y subyacente por la formación Toluca Superior. Los sólidos totales disueltos (STD), representados por los iones Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ y NO₃⁻ se estimaron por ser mayores de 4000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a una profundidad de 12 m en la zona de las líneas del estudio geoelectrico. Se determinó que el agua subterránea no es apropiada para uso doméstico en esta zona.

Palabras clave: resistividad, lixiviados, piezómetros, pluma contaminante.

*Autores de correspondencia
Email: rrgtz17@hotmail.com

Introducción

El área de estudio se caracteriza por la existencia de bancos de material (arena, grava tepojal), que se explotan para la construcción. El principal impacto adverso que se origina por el relleno de bancos de material con residuos sólidos urbanos (RSU) en estas zonas de explotación, es la producción de lixiviados que alteran la calidad del agua subterránea para uso doméstico, así como de las aguas superficiales que reciben estos lixiviados (LaBrecque, 1996; Lee and Jones, 1996). Las técnicas geofísicas varían ampliamente en términos de los parámetros que miden, incluyendo parámetros físicos y químicos. Estas técnicas, se han utilizado en diversos medios geológicos y en diferentes problemáticas como agua subterránea, geotermia, minería, arqueología y en el ámbito del medio ambiente (contaminación de suelos y agua subterránea). El método geofísico más ampliamente utilizado en hidrogeología es la técnica geoelectrica. El método de resistividad es el preferido de todas las técnicas eléctricas y puede determinar el espesor del acuífero y la profundidad al basamento. La tomografía eléctrica es un método prospectivo geoelectrico no destructivo, utilizado para estudios ambientales y exploración del agua subterránea, que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, diferenciándolos en función de su resistividad eléctrica, propiedad de los materiales que indica su grado de oposición a conducir la corriente eléctrica a través de ellos. El método de tomografía eléctrica, se ha aplicado a la exploración de objetivos someros (Olayink y Barker, 1990; Acworth y Griffith, 1985), porque es más resolutive para objetivos someros que profundos, ya que el ambiente poco profundo es una de las áreas más exigentes para cualquier técnica geofísica, por sus cambios laterales rápidos en las profundidades someras y variaciones en las propiedades tensoriales de los materiales (Dahlin y Loke, 1998). El presente estudio se realizó para obtener información sobre la hidrogeología del área y para mapear la pluma de lixiviado que emana del basurero. Además, el estudio ha servido de base para propósitos de modelación del flujo y transporte de contaminantes.

Materiales y método

Localización y esquema geológico

La cuenca del Alto Lerma se localiza en el centro de México, a una altitud de 2600 msnm (metros sobre el nivel del mar) y a unos 60 km de la Ciudad de México. El sitio de estudio donde se emplaza el basurero de residuos sólidos urbanos (RSU), se ubica al oeste, en las afueras a 1 km del poblado de Mexicaltzingo, a 6 km al sur del municipio de Metepec y a 10 km al sureste de la ciudad de Toluca (Capital del Estado de México), entre la latitud 19° 12' 59.50" Norte y longitud 99° 35' 53.62". Este dentro del meridiano maestro 14Q, cubriendo un área de 1.4 ha. La operación de esta instalación de residuos dio inicio en 1999, suspendiendo operaciones de 2006 a 2008 (COMECYT, 2012) y a partir de ese año continua en operación hasta la fecha, con una cantidad total de residuos de 7.1 millones de toneladas recibiendo 105 ton/año. La máxima diferencia en elevación entre el techo del basurero y el nivel del terreno circundante es de aproximadamente 6 m, que imprime una presión al lixiviado dentro del agua subterránea circundante (DOE, 1999). La figura 1 muestra la localización del basurero y la topografía del sitio. El clima del área es húmedo, caracterizado por una temperatura que varía de 0° a 24° C y una precipitación media anual de 600 mm.

Geológicamente el área se encuentra dentro de dos provincias geológicas del Eje Neovolcánico, en la Formación Toluca Superior, de depósitos aluviales del Cuaternario, provenientes del volcán Nevado de Toluca (4660 msnm), un estratovolcán que se formó a finales del Plioceno y principios del Pleistoceno al oeste y; de la Sierra de las Cruces al este. Litológicamente consiste de material granular estratificado de arcillas, limos, arenas y gravas. El basurero se encuentra sobre estos depósitos y por el extremo noreste se encuentra una excavación a 4 m de profundidad que se inunda con agua subterránea. Al noreste de Mexicaltzingo se ubica el complejo industrial integrado por los municipios de Metepec, Lerma, Xonacatlán, San Mateo Atenco y Ocoyoacac. Al este se ha desarrollado otro complejo industrial que comprende los municipios de Capulhuac, Santiago Tianguistengo y Almoloya del Río. Al sur se localiza el poblado de Calimaya y Tenango del Valle. Al norte y noreste se ubican la Ciudad de Toluca y Zinacantepec, respectivamente. La provincia Eje Neovolcánico cubre la mayor parte del estado en su porción norte. Limita al sur con la Sierra Madre del Sur. Está caracterizada geológicamente por el predominio de rocas

volcánicas que datan del Terciario y del Cuaternario.

Hidrogeología

Hidrogeológicamente el área de estudio consiste de un acuífero libre, constituido por material granular de arcillas, limo, arenas y gravas. La porosidad se determinó de 0.21-0.35. El nivel del agua medido en los cuatro piezómetros instalados en el sitio es de 4 m de profundidad en épocas de estiaje y de 2 m en época de lluvia y presenta una dirección general de suroeste a noreste como se muestra en la figura 2.

La distribución de la elevación del nivel del agua en tres piezómetros estudiados en el basurero, los niveles del agua en los piezómetros PZ2, PZ3 y PZ6, fueron de 7.8 m, 6.7 m y 5.8 m respectivamente durante en el área vecina al basurero, gradiente arriba, dentro del sitio del basurero y gradiente abajo, respectivamente (Figura 2). Estos piezómetros se perforaron a una profundidad de 30 m para obtener información de la litología, de la calidad del agua y para medir la carga hidráulica.

Adquisición de datos y procesamiento

Para la realización de éste trabajo, se ha empleado el método eléctrico de resistividades en su

modalidad de tomografía eléctrica. El método, se basa en la implantación de electrodos a lo largo de perfiles, con una separación que viene condicionada por el grado de resolución, la profundidad y los objetivos que se pretendan cubrir, de tal manera que, a menor separación mayor resolución y a mayor separación mayor profundidad. Específicamente, la técnica de imágenes geoelectricas resistivas se ha aplicado en este estudio para detectar la pluma de lixiviado que emana del Basurero de Mexicaltzingo con espaciamiento entre electrodos de 3 m y longitud total de 72 m (12 electrodos en cada extremo del tendido), para conseguir, con suficiente resolución, detectar la pluma de lixiviado tanto lateral como verticalmente a una profundidad de 12 m.

En el área de estudio se realizaron 18 líneas geoelectricas (MLG1, MLG2,..., MLG18), pero aquí sólo se presentan dos líneas perpendiculares al basurero con un rumbo de oeste a este, en la modalidad de imagen de resistividad 2D (Figura 1). El método utilizado para obtener imágenes de resistividad eléctrica 2D consistió en medir la resistencia del terreno utilizando un resistivímetro SYSCAL KID SWITCH 24 de IRIS INC (dos cables con 12 electrodos cada uno, con espaciamiento entre electrodos de 3 m y

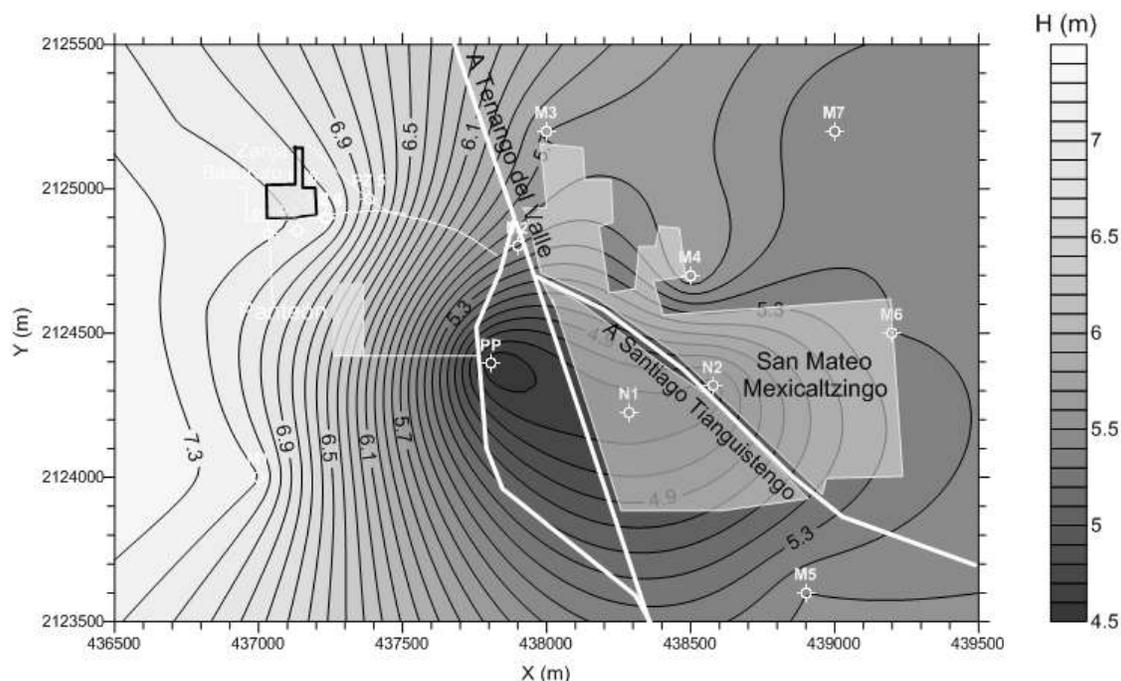


Figura 2. Dirección del flujo subterráneo (Tomado de COMECYT, 2012).

profundidad de investigación de 12 m). La configuración de electrodos fue un arreglo tipo Wenner Switch. Los datos obtenidos se procesaron posteriormente con RES2DINV (programa de cómputo de interpretación de imágenes de resistividad 2D). El programa de interpretación calcula la resistividad real y la profundidad real del terreno del archivo de datos de entrada utilizando los procedimientos de cálculo de la Matriz Jacobiana y modelación hacia adelante. Los resultados de la interpretación se despliegan como una imagen eléctrica de resistividades 2D del subsuelo a lo largo de cada línea de estudio (IRIS, 1998; Griffiths *et al.*, 1990).

Siguiendo el procedimiento de Todd (1980), se estimó una dirección predominante suroeste-noreste para el flujo del agua subterránea por la profundidad del nivel del agua obtenida en los piezómetros instalados en la zona del basurero. Los resultados de la campaña de monitoreo muestran la existencia de una pluma contaminante que excede los límites del basurero gradiente abajo, al noreste. El basurero no cuenta con ninguna protección y el ambiente local no está protegido de esta fuente contaminante.

La hidroquímica del agua subterránea se determinó por el muestreo de los piezómetros ubicados en las áreas gradiente arriba y gradiente abajo del basurero. El muestreo se llevó a cabo por un periodo de seis meses, utilizando muestreadores verticales. Las muestras de agua subterránea se colectaron y se almacenaron en botellas de polipropileno de 1.0 l. Las muestras colectadas se

guardaron en una hielera y se enviaron al laboratorio para su conservación y análisis químico. Las muestras se conservaron a una temperatura de 4°C y se acidificaron con ácido hidroclicórico a un pH menor a 2.0 para minimizar la precipitación y adsorción en las paredes de los contenedores.

La evaluación de la calidad del agua subterránea se realizó para parámetros in situ medidos en campo y por análisis químico en laboratorio. Los parámetros in situ fueron pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica (APHA-AWWA-WEF, 1985; WHO, 1984). Estos parámetros se determinaron utilizando un potenciómetro Hanna modelo HI 9828 con electrodo de vidrio para pH, temperatura y conductividad eléctrica y medidor de oxígeno disuelto, respectivamente. Los parámetros de laboratorio incluyen los cationes mayores, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, and Mg²⁺, se determinaron por Espectroscopia de absorción atómica. Los Aniones mayores Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ y NO₃⁻ determinados con la técnicas de análisis cuantitativo y de espectroscopia de Uv-visible.

Resultados y discusión

Durante el muestreo se obtuvieron parámetros que permiten diferenciar agua limpia de agua con lixiviados. Una relación entre los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica muestran una relación ($y = 1.4893x - 43.57$) positiva ($p \leq 0.05$) como se muestra en la figura 3. El programa de computadora Surfer 7 (Golden Software Inc., 1994)

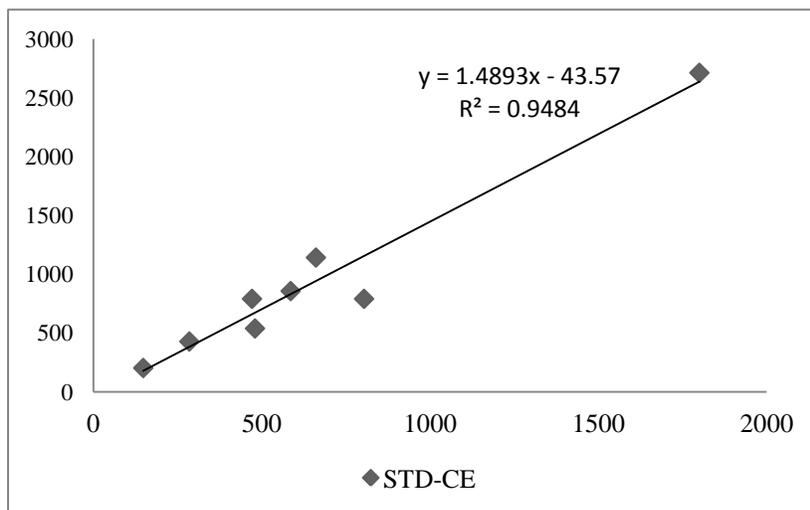


Figura 3. Correlación entre los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica.

se utilizó para graficar y contornear los valores de los STD, CE y otros parámetros de la formación acuífera.

Las interpretaciones de los perfiles de tomografía eléctrica se han realizado mediante el Software de interpretación RES2DINV (Loke y Barker, 1996, Loke, 1998; Loke, 2001; Loke y Dahlin, 2002) de resistividad y polarización inducida. Este programa de cálculo se basa en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado, modificado con la técnica de optimización Cuasi-Newton. El método de inversión construye un modelo del subsuelo mediante prismas rectangulares y determina los valores de resistividad para cada uno de ellos minimizando la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados (Loke y Barker, 1996, Loke y Dahlin, 2002).

Variación vertical de la resistividad en la formación acuífera

La resistividad eléctrica ó el inverso de la misma (la conductividad eléctrica) es un parámetro que permite correlacionar la respuesta del medio acuífero y el lixiviado de interés en este estudio. El sondeo eléctrico vertical MXD2, se localiza en lado este del basurero a cielo abierto. La respuesta eléctrica obtenida muestra claras diferencias de cuatro capas (Figura 4); la primera capa se asocia

con material de grano fino seco con una resistividad de 174.2 Ohm-m y un espesor de 1.8 m. La segunda capa muestra una disminución de la resistividad con un valor de 27.2 Ohm-m a una profundidad de 2.1m indicando la posible presencia de lixiviado diluido. Se detectó una tercera capa con un valor de 44.2 Ohm-m a una profundidad de 34.0 m. Debajo de esta capa se detecta una unidad con una resistividad de 668.7 Ohm-m lo que determina la exigencia de gravas a esta profundidad de la formación aluvial.

La figura 5 muestra los modelos de la inversión de la resistividad de tres líneas resistivas Perfiles MXD2, MXA1 y MXA2). La figura 5a corresponde a la línea resistiva (MXD2) localizada en la porción Norte del basurero, corriendo en dirección de Oeste-Este. La imagen de resistividad de esta línea se ubica donde inicia el colector de los lixiviados, la base (primera posición del electrodo) apunta hacia el Este donde la última posición del electrodo se ubica a una distancia de 72 m dentro de un campo de cultivo. La anomalía conductiva se interpreto como la pluma de lixiviado. Las imagen de resistividad muestra que hay una zona de residuos descompuestos, saturada con lixiviados muy conductivos, con una resistividad menor a 2.5 ohm-m. Esta zona se encuentra a partir de una profundidad de 8 m de la superficie del terreno del basurero y ocupando la parte inferior del área de la

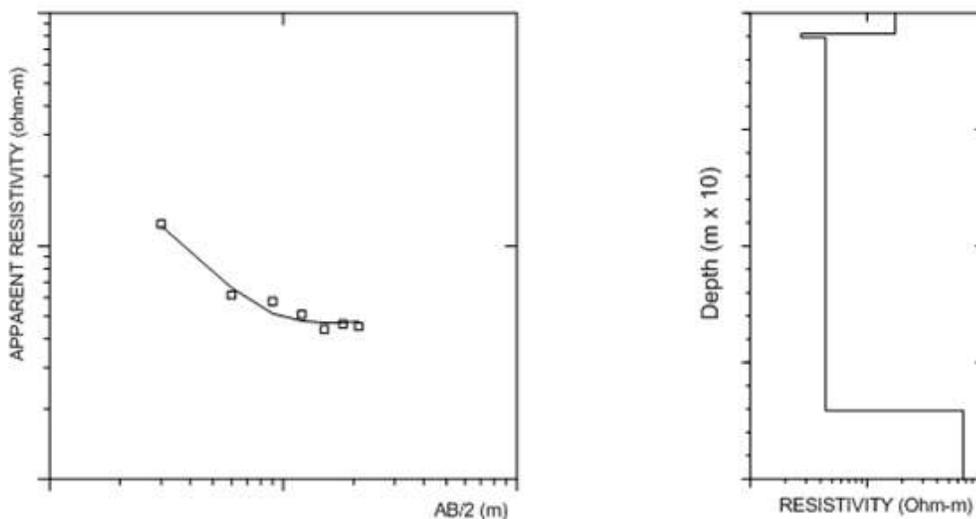


Figura 4. Sondeo eléctrico vertical MXD2.

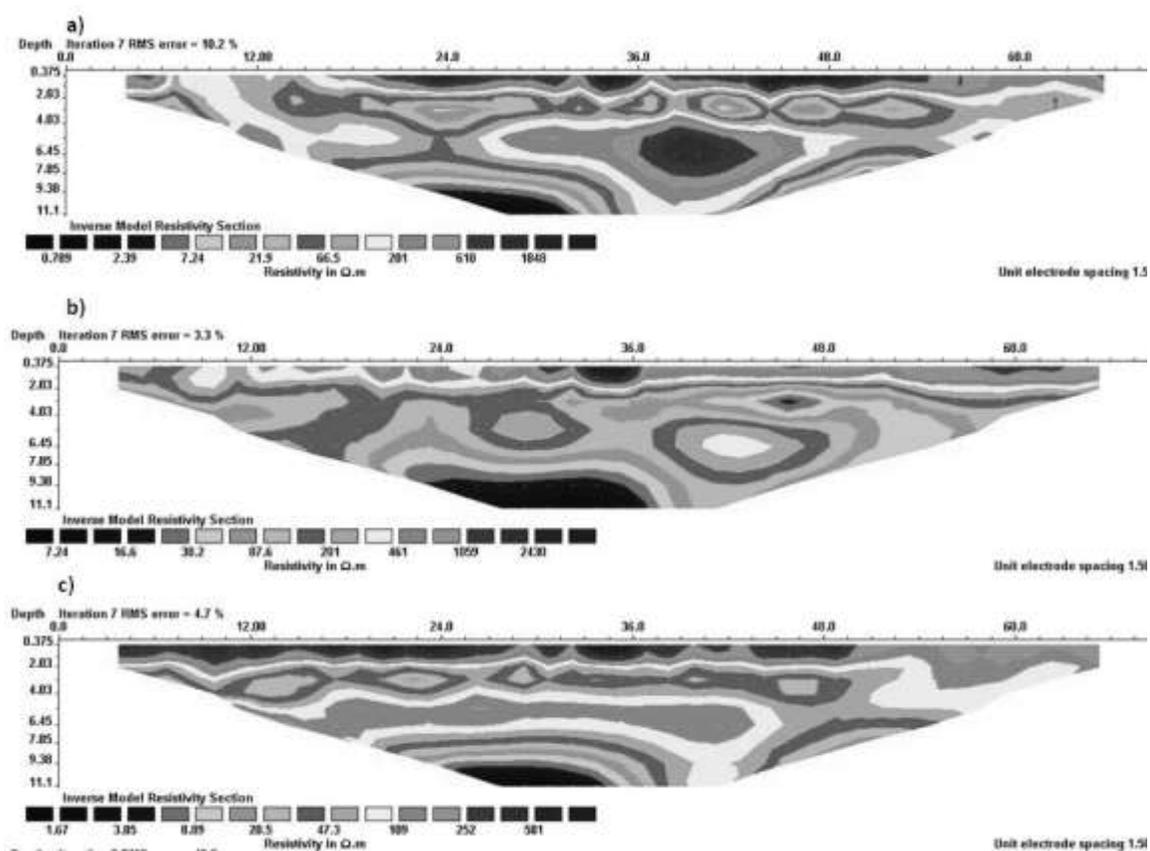


Figura 5. Imagen resistiva a lo largo de los perfiles a) MXA1, b) MXA2 y c) MXD2.

imagen de resistividad. La Línea MXA2 y MXA1 son contiguas cada una de 72 m hasta 144 m, y la zona refleja un grado variable de descomposición del residuo con valores de la resistividad menores de 7 ohm-m (de 7 a 1 ohm-m), a partir de los 8 m de profundidad. La capa de alta resistividad en la cima de la imagen muestra la presencia de material arcillo-arenoso seco con resistividades mayores a 600 ohm-m, y a la mitad de la imagen MXD2 la presencia de un lente de gravas con resistividad de 600 ohm-m. La imagen resistiva MXD2, también muestra el posible movimiento de lixiviado muy conductivo con una dirección, a partir del basurero, hacia el este en el sentido del flujo del agua subterránea.

Conclusiones

Se puede concluir que el agua subterránea en la

zona del basurero es inapropiada para uso doméstico debido a la presencia de altos valores de los sólidos disueltos totales y de la conductividad eléctrica. Con respecto al estudio geoelectrico, en su modalidad del sondeo eléctrico vertical y de tomografía eléctrica, es una técnica útil para evaluar la calidad del agua subterránea en zonas de disposición de residuos sólidos urbanos y es más útil cuando se combina con la química del agua subterránea y la hidrogeología del área de estudio. La geofísica permite no sólo un estudio continuo sino también una disminución significativa en el costo comparado con el método convencional de perforación.

Agradecimientos

Este estudio fue apoyado por el COMECYT. Se agradece además al Instituto Tecnológico de Toluca

por las facilidades en el apoyo de análisis químicos y recolección de muestras.

Bibliografía

- La Brecque, D., Ramirez, A., Daily, W., Binley, A., and Schima, A. 1996. ERT Monitoring of Environmental Remediation Processes. *Measurement Science and Technology* 7: 375-383.
- Lee, G. F., and Jones-Lee, A. 1996. Landfill leachate management: overview of issues. *MSW Management*, 6: 18-23. Report of G. Fred Lee and Associates, El Macero, California.
- Olayinka, A. I. and Barker, R. D. 1990. Borehole siting crystalline basements area of Nigeria with a microprocessor controlled resistivity traversing system. *Ground Water*, 28: 178-183.
- Acworth, R. I. and Griffith, D. H. 1985. Simple data processing of tripotential apparent resistivity measurements as an aid to the interpretation of subsurface structure. *Geophysical Prospecting*, 33: 861-887.
- Dahlin, T. and Loke, M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling, *Journal of Applied Geophysics*, 38, 237-249.
- COMECYT, (2012). Vertedero de residuos sólidos urbanos del municipio de Mexicaltzingo, Estado de México. Informe Técnico, CLAVE: FECYT-2009-CO2-01, p. 190
- DOE. 1999. Department of Environment. Investigation and assessment of municipal landfill sites in the federal territory of Kuala Lumpur. (Unpublished Report).
- IRIS-Instruments (1998): User manual of Syscal Junior-R2, Multi- electrode system. Orleans Cedex, 98 p.
- Griffith, D. H., Turnbull, J. and Olayinka, A. I. 1990. Two-dimensional resistivity mapping with a computer controlled array. *First Break*, 8: 121-129.
- Todd, D. K. 1980. *Groundwater Hydrology*. Wiley and Sons Inc., New York, USA.
- APHA-AWWA-WEF. 1985. *Standard methods for the examination of water and waste water*. 19th ed. Washington D.C.
- WHO. 1984. *World Health Organization. Guidelines for Drinking Water Quality, Vol. 1, Recommendations*, Geneva: WHO, 130.
- Golden Software Inc. (1994). *Surfer 7 access system version for Windows. User Guide*, p. 511
- Loke, M. H. and Barker, R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a Quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.
- Loke, M.H. 1998. *RES2DINV, Rapid 2D resistivity and IP inversion using least squares methods*, User manual, Austin Tex., Advanced Geosciences, Inc., 66p.
- Loke, M.H. 2001. Constrained time lapse resistivity imaging inversion. *The Environmental and Engineering Geophysical Society SAGEEP 2001 Symposium Program*, March 2001, Denver: 34.
- Loke MH, Dahlin T (2002) A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *J Appl Geophys* 49:149-162