



Identificación de la migración del lixiviado en un tiradero a cielo abierto mediante sondeos eléctricos verticales

Identification of leachate migration in an open-air dump by means of vertical electrical soundings

María-del-Sagrario Quiroz-Castillo¹, Diana-Guadalupe López-Torres¹, Reinaldo-David Martínez-Orozco¹, Óscar-Alberto Izaguirre-Ávila¹

¹ Tecnológico Nacional de México – IT Ciudad Madero, Tamaulipas, México.

Recibido: 31-10-2022

Aceptado: 07-12-2022

Autor correspondal: reinaldo.mo@cdmadero.tecnm.mx

Resumen

En este trabajo se empleó el método de resistividad eléctrica para identificar las zonas posibles de contaminación debido a un vertedero municipal a cielo abierto, ubicado en Ciudad Madero, Tamaulipas, México. El estudio se realizó con la finalidad de determinar la presencia y zona de influencia del lixiviado generado por dicho vertedero hacia los alrededores de su punto de ubicación. Con ello, establecer la dirección del flujo del lixiviado, de acuerdo con los datos de la geografía del área de estudio, hacia zonas circundantes, como son las lagunas y/o cuerpos de aguas subterráneas. Los resultados de la inversión 2D en los perfiles realizados mostraron zonas de baja resistividad que indican la influencia de la pluma de lixiviado, con migración preferencial hacia las aguas subterráneas derivado de la estratigrafía que favorece su escurrimiento. Los resultados de VES mostraron una profundidad del nivel freático localizado a menos de 10 m de profundidad, con la pluma de lixiviado fluyendo en dirección noreste. Estos resultados muestran la importancia y el potencial de los métodos de resistividad eléctrica en la identificación de la migración de lixiviados basado en sondeos eléctricos verticales., así como de la elección de los terrenos adecuados para actuar como basureros, de acuerdo con la estratigrafía.

Palabras clave: lixiviado, migración, resistividad del sitio, tomografía de resistividad eléctrica, contaminación

Abstract

In this work, the electrical resistivity method was used to identify possible areas of contamination due to an open-air municipal landfill, located in Ciudad Madero, Tamaulipas, Mexico. The study was carried out with the purpose of determining the presence and zone of influence of the leachate generated by landfill towards the surroundings of their location point. Like this, establish the direction of the leachate flow, according to the data of the geography of the study area, towards surrounding areas. such as lagoons and/or groundwater bodies. Results of 2D inversion at carried put profiles showed zones of low resistivity that indicate the influence of the leachate plume, with preferential migration towards groundwater derived from the stratigraphy that favors its runoff. The VES results showed a localized water table depth less than 10 m deep, with the leachate plume flowing in a northeasterly direction. These results show the importance and potential of electrical resistivity methods in the identification of leachate migration based on vertical electrical soundings, as well as, the choice of suitable land to act as dumps, according to its stratigraphy.

Keywords: leachate, migration, site resistivity, electrical resistivity tomography, contamination

Introducción

La forma más simple y económica para disponer los residuos sólidos urbanos (RSU) son los rellenos sanitarios (Renou, 2008). Sin embargo, la gran diversidad los residuos contenidos en dichos vertederos municipales y su distribución espacial, hace difícil evaluar el grado de riesgo y peligro que representan de forma individual (Ramakrishnan 2014). Por ello, es necesario identificar la ubicación, migración y contenido de los RSU para definir las acciones y estrategias necesarias de saneamiento.

En el año de 1994 el Municipio de Cd Madero contaba con cuatro tiraderos municipales establecidos: uno cercano a la playa, otro asentado e invadido a un costado de la carretera que enfila hacia la playa, a la altura de la colonia Natividad Garza Leal; la tercera en la Colonia Tierra Negra y una última, que permanece aún en uso y localizada al norte de la Colonia SAHOP, a un costado de la colonia Ampliación Candelario Garza, de Ciudad Madero, Tamaulipas.

Tres de ellos comparten la característica de ser tiraderos a cielo abierto y rellenan una misma laguna de forma intermitente, aunque en puntos diferentes y no cuentan con una disposición adecuada de los RSU. El tiradero ubicado en la colonia Tierra Negra inicialmente se asentaba sobre esta laguna y actualmente, no quedan vestigios del cuerpo de agua. Durante un periodo de 25 años esta zona ha sido contaminada con diferentes desechos sólidos producidos por la población de Cd. Madero. Durante la época de lluvias, es visible el escurrimiento de los lixiviados. Estos lixiviados son generadores de los vertederos y suelen contener altas concentraciones de materia orgánica disuelta (DOM), sales inorgánicas, metales pesados y compuestos orgánicos xenobióticos (Christensen, 2001).

Los lixiviados son los líquidos formados de la putrefacción de la basura orgánica, inorgánica y de sólidos suspendidos, así como de microorganismos que se mezclan todos ellos con la infiltración del agua pluvial. Tienen la característica de tener un color oscuro y mal olor. Sus componentes varían según la edad de los vertederos, la composición de los residuos y la variación estacional (Abiriga, 2020). Una vez integrados al medio ambiente pueden ser más contaminantes que el desecho de origen, comprometiendo los recursos hídricos y el suelo. El problema se agrava cuando comienza a infiltrarse a la tierra y agua subterránea, ya que tienden a contaminar pozos o mantos acuíferos que abastecen de agua potable a la ciudad, y pueden producir una variedad de enfermedades al consumidor. Asimismo, en caso de incendios, generan humo altamente tóxico que origina problemas pulmonares y hasta cáncer (Reyes-López, 2008, Shi. 2021). Por ello, es primordial que reciban un tratamiento que los inactive.

Los objetivos de este trabajo, fue identificar la presencia y dirección de flujo de la pluma contaminante en el subsuelo, tanto en zonas saturadas como no saturadas de un tiradero a cielo abierto, por medio de la aplicación de los sondeos eléctricos verticales (SEV), para en una segunda etapa coleccionar muestras de los lixiviados para determinar su composición.

Ubicación topografía y clima del área de estudio

El área de estudio está ubicada en la Colonia SAHOP, localizado en Cd. Madero, Tamaulipas. Se caracteriza por ser un tiradero a cielo abierto y no cuenta con una disposición adecuada de los RSU. Durante un periodo de 25 años esta zona ha sido contaminada con diferentes desechos sólidos producidos por la población de Cd. Madero, alterando el medio ambiente y causando un daño ecológico. Durante la época de lluvias llega a producir su principal contaminante que son los lixiviados, que al filtrarse pueden llegar a contaminar las aguas superficiales y subterráneas, así como áreas aledañas.



Figura 1: Ubicación del tiradero a cielo abierto de Ciudad Madero, Tamaulipas, México

Este tiradero a cielo abierto de Cd. Madero contiene alrededor de 2 millones de toneladas de basura y ocupa una superficie promedio de 32 hectáreas. Actualmente no recibe basura de manera oficial, pero sí de forma clandestina. Alrededor de la mitad de su superficie se encuentra ubicado sobre una laguna y a un costado del acuífero freático y las aguas subterráneas se encuentran a menos de 10 m de profundidad.

Existe contaminación en los cuerpos de agua superficial y subterránea por la generación de lixiviados, así como migración descontrolada del biogás hacia las zonas donde existen asentamientos humanos. Durante las épocas de lluvia la zona de estudio es a propensa a inundaciones y generación de malos olores. En temporadas de nortes, las colonias aledañas a la zona padecen de polvaredas y los residuos urbanos son dispersados.



Figura 2. Área de estudio del tiradero a cielo abierto. Acumulación de los RSU al aire libre y sobre cuerpos de agua

Por otra parte, la basura depositada en el suelo o en los cuerpos de agua son directamente incorporados al subsuelo a través de procesos de degradación. Esto origina un serio problema de contaminación y dispersión de los contaminantes por medio del agua, donde se sospecha de la presencia de metales pesados, con altas turbidez del agua y materia fecal, de acuerdo con los resultados preliminares realizados en la zona (ver Figura 3).



Figura 3. Área de estudio del tiradero a cielo abierto. A) acumulación de los RSU sobre cuerpos de agua, B) muestreo en la zona de interés, C) presencia de los lixiviados en los pozos perforados, D) muestra de núcleo con contaminación por lixiviados.

Geología e hidrogeología del área de estudio

La geología del área comprende la formación Tuxpan de edad reciente y comprende la unidad en donde se localiza el acuífero libre o freático. La formación Tuxpan está constituida por capas de arenisca calcárea, de lutitas con arenas con predominio de areniscas. Los sedimentos de esta formación fueron depositados durante una trasgresión de aguas someras seguidas por una regresión, hasta alcanzar su posición actual en el golfo de México.

El área de estudio cuenta con la presencia de un acuífero libre constituido por arenas cuya principal zona de recarga es la lluvia que capta directamente. En el acuífero existe una superficie real de agua encerrada, que está en contacto con el aire a la presión atmosférica. Entre la superficie del terreno y el nivel freático, se localiza la zona no saturada.

La geología local se encuentra dentro de la provincia Llanura costera del golfo de norte (INEGI 1983). La estratigrafía presente en el área de estudio corresponde a una secuencia inicial (superficialmente) de limo arcilloso con bajo contenido de materia orgánica de color café claro a café oscuro, con un espesor promedio de 0.15 a 0-30m. Este depósito yace sobre un estrato de arena limosa o limo arenoso color café claro, cuyo espesor se ubica entre 1.0 a 2.5 m aproximadamente. Posteriormente, a mayor profundidad, se encuentra una secuencia de arena con gravillas y fragmentos de conchuelas, con espesor de entre 8 a 20 m. Estos depósitos sobre yacen al sustrato impermeable formado por una arcilla de color gris verde-olivo, misma que presenta al tacto alta plasticidad.

Materiales y métodos

El Sondeo Eléctrico Vertical es una herramienta ampliamente utilizada por su sencillez y la relativa economía del equipo necesario. Los materiales utilizados incluyen equipos convencionales como voltímetro digital, un miliamperímetro digital, cuatro electrodos metálicos, una pila de baterías y cables con longitudes suficientes. Los instrumentos digitales utilizados fueron de diferentes escalas de lectura acorde a los valores obtenidos. Las pilas se pueden conectar en serie y obtener una tensión de trabajo suficiente, sobre todo para separaciones grandes de los electrodos metálicos. La Figura 4 muestra un ejemplo de los arreglos utilizados para los sondeos eléctricos verticales (Loke, 1996, Busquest 1995).

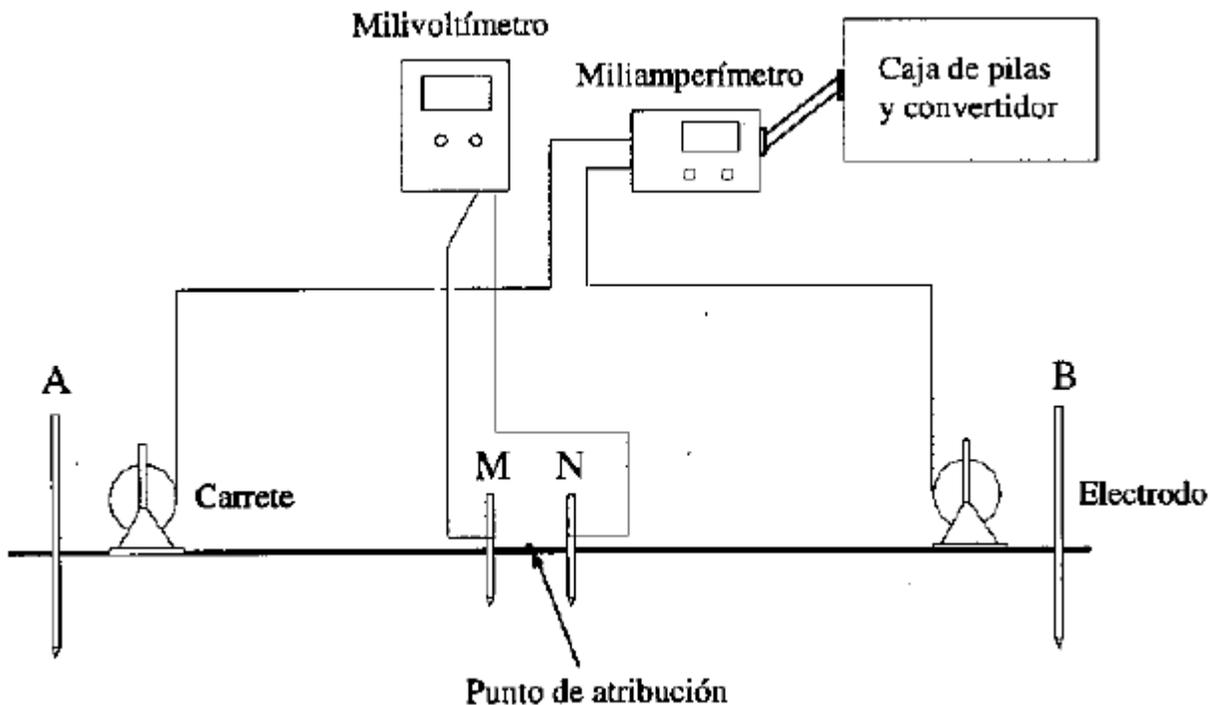


Figura 4. Esquema del tendido experimental de los sondeos eléctricos verticales utilizados.

Se utilizó el arreglo de Schlumberger durante los datos de adquisición de la resistividad aparente. Brevemente la técnica consiste en enviar una corriente directa al suelo a través de un par de electrodos de corriente, mientras que la caída de voltaje se midió a través de otro par de electrodos de potencial, para muestrear la variación de las propiedades del subsuelo y del área de influencia del lixiviado a lo largo de dos perfiles del área de estudio, dentro y alrededor del vertedero (Hasan, 2021).

Después de adquirir los datos de resistividad aparente sobre los perfiles de interés, la variación en los valores de resistividad fue empleado en la interpretación de la pluma de lixiviado a través de un modelado inverso (Loke, 1996).

Se realizaron un total de 7 sondeos geoelectrónicos; 4 distribuidos en la zona de estudio y los otros 3 restantes fuera de ella, para fines de comparación de datos como se muestra en el esquema de los sondeos realizados en la Figura 5.

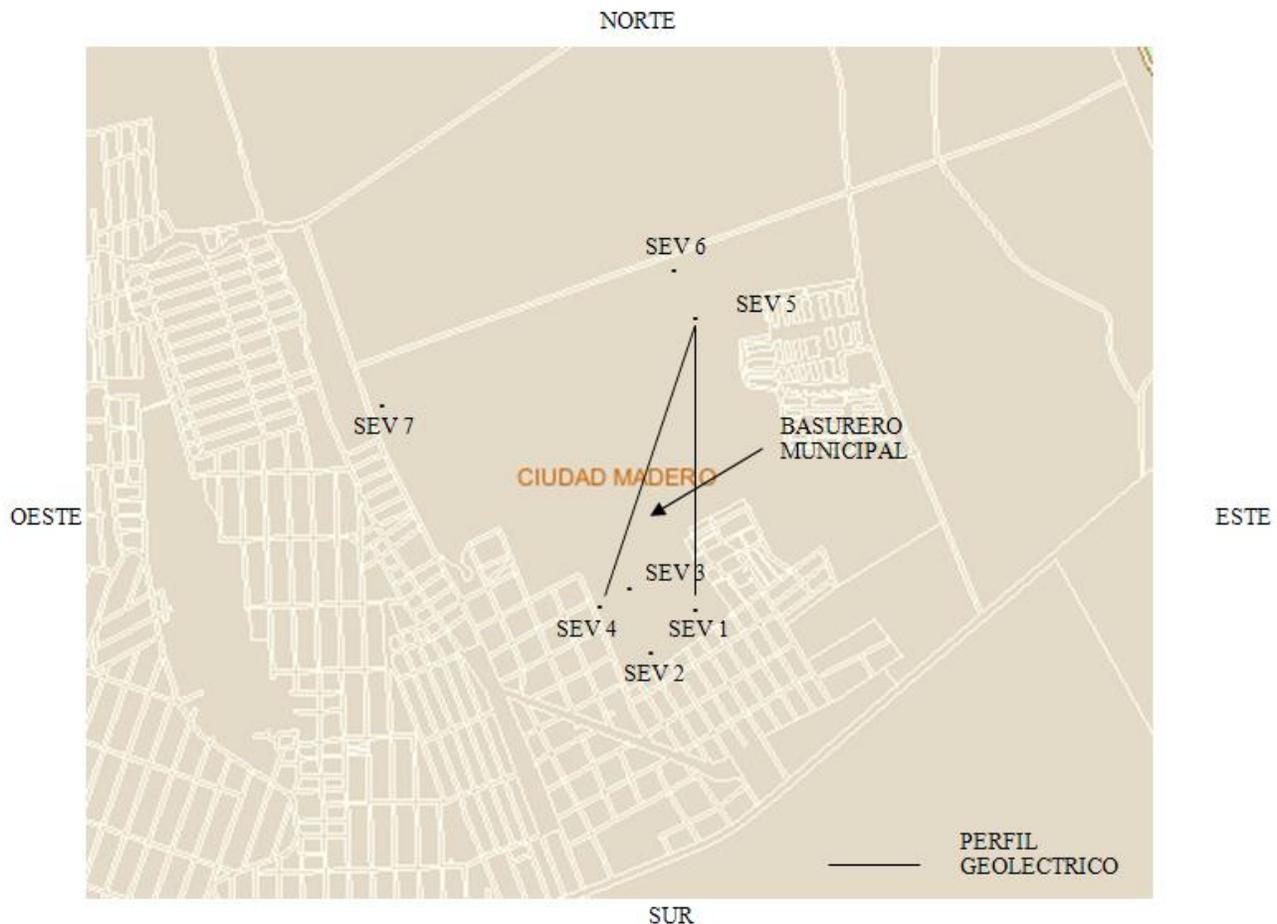


Figura 5. Esquema de ubicación del área de estudio y del tendido experimental de los sondeos eléctricos verticales realizados.

Resultados y discusión

La Figuras 6 muestra la inversión de los datos de matriz de Schlumberger a lo largo del perfil 1. Este perfil fue adquirido en una tendencia NE-SW a través del vertedero. La inversión de la resistividad aparente se obtuvo después de 10 iteraciones con un error RMS del 14.3 %, como muestra la pseudosección en la Figura. 6, en donde la resistividad aparente, medida en Ohmiosmetro, (Ωm) se representa frente a la pseudoprofundidad medida en metros (m).

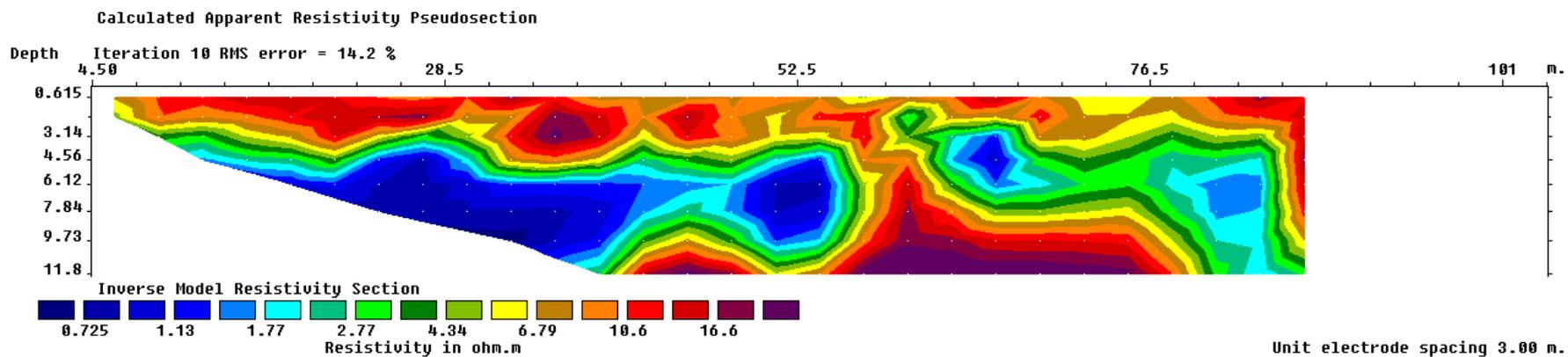


Figura 6. Inversión 2D de los datos de la matriz de resistividad a lo largo del perfil 1 que muestra la variación en la resistividad en el subsuelo, el color azul que representa la menor resistividad y el color rojo las zonas de mayor resistividad.

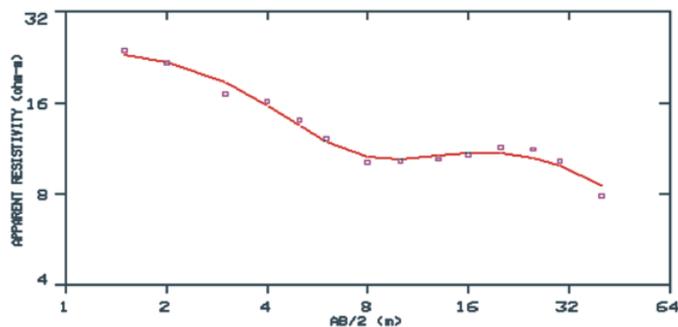
En los datos de inversión se observa una zona de resistividad muy baja, con valores de 0.725 a 1.13 Ω .m etiquetadas en color azul oscuro, que asociamos con la presencia de lixiviado en el subsuelo y localizado a poca profundidad, entre 4 y 10 m (Mainoo, 2019, Zhan, 2019). Este resultado indica una zona de invasión de la pluma de lixiviado, misma que fue comprobada con perforaciones de pozo en el sitio. Sin embargo, también se aprecia que los valores de las resistividades son generalmente bajos, con valores de $> 16.6 \Omega$.m Además, los puntos SEV 4, SEV 6 y SEV 7 exhibieron resistividades muy bajas lo que se infiere de una litología de arcillas-arenas de acuerdo con el muestreo. Este estrato con lixiviados tiene un espesor de aproximadamente 3.54 m que corresponde al relleno de basura compactada y debajo de capa, se encuentra una arcilla de aproximadamente 9.25 m de espesor, lo que nos indica que el lixiviado formado tiene una ruta de migración hacia el noreste. Por otra parte, las resistividades bajas indican la presencia de zonas saturadas dado que dicho vertedero está asentado sobre lo que era una laguna, con la posibilidad de que la pluma de lixiviado haya alcanzado el agua subterránea en esta zona, con la consecuente contaminación de la misma (Ojo, 2022, Okpoli, 2013, Omolayo, 2014).

La Figura 7 muestra los resultados de los sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados y ubicados como SEV 5, SEV 1, y SEV 7. (Ver localización en Figura 5). La curva SEV representa un gráfico de la resistividad aparente versus el espaciamiento ($AB/2$) (Ugbor, 2021). El SEV 5 fue realizado en el extremo noreste opuesto al SEV 4 y nos indica la presencia de arenas de la formación Tuxpan. Los sondeos 4 (no se muestra) y 5 revelan que el basurero se encuentra sobre un cambio lateral de facies de lutitas a areniscas de edad reciente, de acuerdo con el bosquejo de la litosección y considerando las posiciones relativas de los puntos de muestreo SEV en el área de estudio. Este resultado sugiere que hacia el oeste tenemos arcillas y hacia el este tenemos la presencia de arenas, mismo que representa un problema, debido a que el peso de la basura depositada ejerce presión y los lixiviados son propensos a desplazamientos hacia la zona de las arenas.

La gráfica SEV 1 fue realizado a la entrada del basurero y está formado por una zona de basura compactada de 5.3 m de espesor y bajo esta capa se tiene la presencia de un estrato de arenas saturadas con agua de 7.44 m de espesor. En este punto, cualquier acuífero que se encuentra debajo del basurero es factible de ser contaminado, pues debajo de este acuífero se encuentra un estrato impermeable de arcillas con espesor no determinado. Los SEV 1 y SEV 5 nos indican la presencia de zonas de arenas con intercalaciones de arcillas. El SEV 5 nos muestra que el espesor del estrato de arenas con agua (acuífero) aumenta su espesor hacia el este.

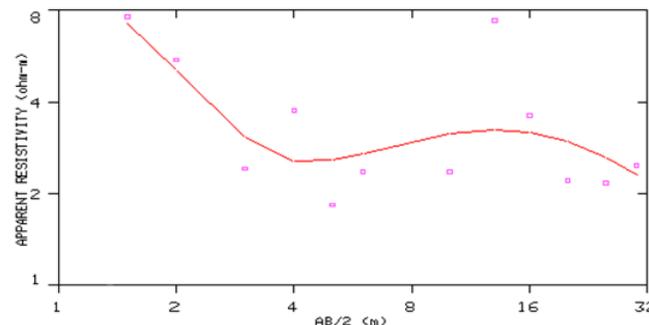
El gráfico SEV 7 fue realizado al noroeste del basurero, dentro de la laguna sobre un borde aproximadamente a 20 m de la orilla, los valores de resistividad aparente nos indica que a una

profundidad de 1.50 m se encuentra un material evaporítico compuesto de yeso y sal, el cual nos da una resistividad muy baja de 0.40 ohm-m y debajo de esta capa se encuentra una arcilla 4.90 m de espesor.



LAYER #:	1	2	3	4
RESIST.:	24.2828	7.1028	15.8131	4.1519
DEPTH:	1.8677	5.4417	16.5857	--INF--
	Arenas húmeda	Arcillas	Arena con	Arcillas

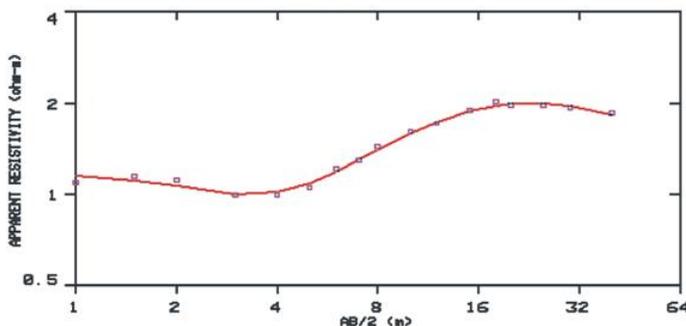
Resistividad aparente del sondeo eléctrico vertical 5



LAYER #:	1	2	3	4
RESIST.:	12.503	1.6288	5.3016	1.0533
DEPTH:	0.785	2.9193	10.2115	--INF--
	Material de relleno	Arena con lixiviado	Arena con arcilla	

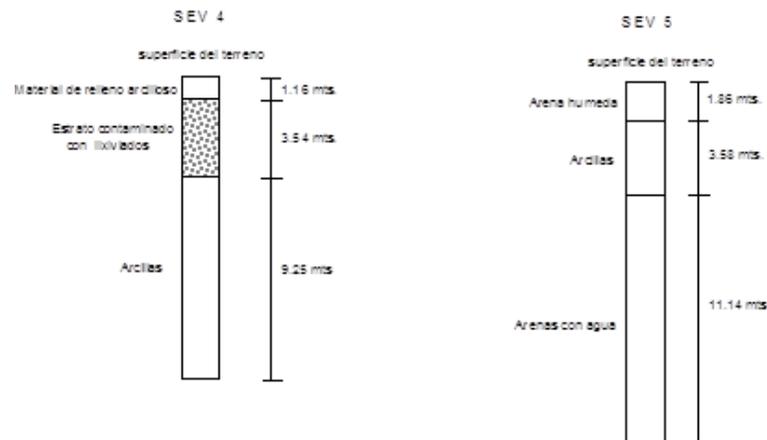
Resistividad aparente del sondeo eléctrico vertical 1.

ESTRATIGRAFIA DE LOS SONDEOS 4 Y 5



LAYER #:	1	2	3	4
RESIST.:	1.1757	0.4067	5.2897	1.3254
DEPTH:	1.4966	2.6369	7.534	--INF--
	Material de relleno	Material Evaporítico Yeso y sal	Arcillas	

Resistividad aparente del sondeo eléctrico vertical 7.



Columnas estratigráficas de los SEV 4 y 5

Figura 7. Sondeos eléctricos verticales en las ubicaciones SEV 1, SEV 5, y SEV 7, columna estratigráfica en los SEV 4 y SEV5.

Un bosquejo del modelo del subsuelo relacionado con la estratigrafía y la resistividad se muestra en la siguiente Figura 8. La litosección fue generada a partir de la información de puntos de muestreo VES 4 y 5, y VES 1 y 5 respectivamente. La correspondencia de las capas geoelectricas y las características eléctricas permite la interpretación de las capas en términos de las características eléctricas en el área del vertedero. En el perfil 4 a 5 se aprecia el cambio lateral de facies de lutitas a areniscas, mientras que el perfil 1 a 5 se muestran la litología de arcillas-arenas, acorde con los muestreos realizados.

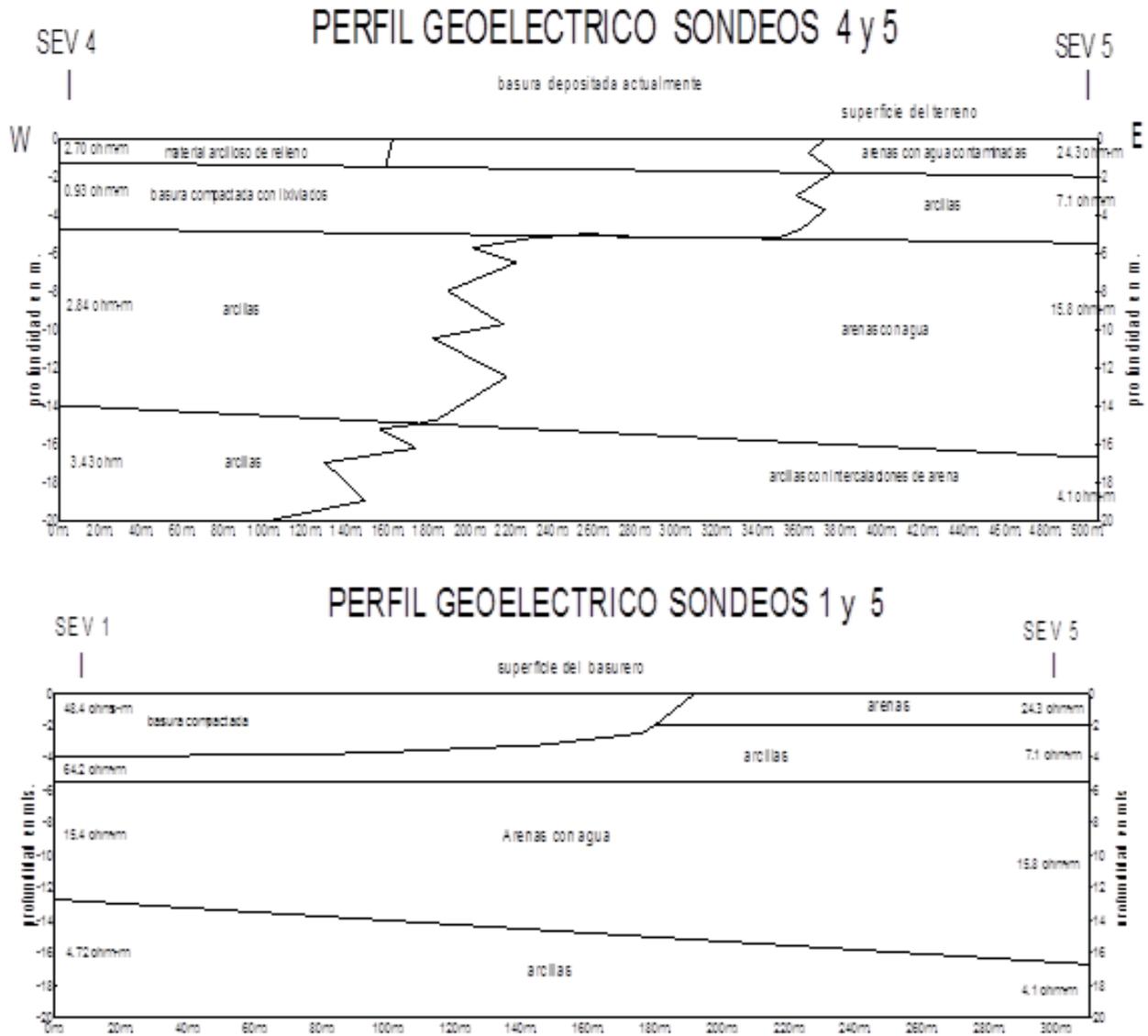


Figura 7. Perfil geoelectrico mostrando en la zona del vertedero municipal.

Conclusiones

En el caso particular del depósito de basura de Cd. Madero, Tamaulipas, México, y después de realizar el estudio preliminar, se pueden inferir de las secciones de inversión 2D, así como de los datos de VES permiten identificar las áreas afectadas por los lixiviados. Los resultados sugieren la migración de lixiviados hacia el subsuelo y los suelos circundantes hacia el noreste en el área de estudio. Siendo las contaminadas principales, la basura depositada sobre la zona. Los terrenos sobre los que se encuentra el depósito de basura, corresponden a zonas de arenas altamente permeables, que facilita la migración de los lixiviados generado por la descomposición de la basura y, por lo tanto, existe un riesgo de contaminación mayor para la salud humana, debido a que las aguas subterráneas se encuentran localizadas a menos de 10 metros de profundidad. Por el desconocimiento del marco geológico y de la hidroestratigrafía del lugar, el depósito de basura fue instalado en el lugar menos indicado, por ello, es necesario realizar más estudios geológicos-geofísicos para definir las rutas globales de migración de los lixiviados, para poder determinar su velocidad de desplazamiento dentro del medio poroso en que se encuentran.

Referencias bibliográficas

- Abiriga, Daniel.; Vestgarden, Live S.; Klempe, Harald. (2020) Groundwater contamination from a municipal landfill: Effect of age, landfill closure, and season on groundwater chemistry. *Science of the Total Environment* 737, 140307.
- Busquets, E., & Casas, A. (1995). Caracterización de vertederos y detección de penachos contaminantes mediante la utilización de métodos geofísicos. *Física de la tierra*, 7.
- Christensen, T.H.; Kjeldsen, P.; Bjerg, P.L.; Jensen, D.L; Christensen, J.B.; Baun, A.; Albrechtsen, H.-J.; Heron, G. (2001) Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, Vol 16, (7–8), 659-718.
- Hasan, M., Shang, Y., Meng, H. et al. (2021) Application of electrical resistivity tomography (ERT) for rock mass quality evaluation. *Sci Rep* 11, 23683. DOI: 10.1038/s41598-021-03217-8.
- Loke, M. H. & Barker, R. D. (1996) Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophys. Prospect.* 44(3), 499–523.
- Mainoo, Patrick A.; Manu, E., Yidana, Sandow M.; Agyekuma, William A.; Stigterd, Tibor.; Duaha, Anthony A.; Prekoc, Kwasi. (2019) Application of 2D-Electrical resistivity tomography in

- delineating groundwater potential zones: Case study from the voltaian super group of Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 160, 103618.
- Ojo, Akintayo O.; Olurin, Oluwaseun T.; Ganiyu, Saheed A.; Badmus, Biodun S.; Idowu, Olufemi A. (2022) Electrical Imaging Characterization of a Dumpsite on an Abandoned Quarry Site in Abeokuta, South West, Nigeria. *Scientific African* 17, e01330.
- Okpoli, Cyril Chibueze. (2013) Application of 2D electrical resistivity tomography in landfill site: A case study of Iku, Ikare Akoko, southwestern Nigeria, *Journal of Geological Research*, Article ID 895160, 8 pp, DOI: 10.1155/2013/895160.
- Omolayo, Dare.; Tope, Fatoba Julius. (2014) 2D electrical imaging surveys for leachate plume migration at an old dump site in Ibadan south western Nigeria: A case study. *International Journal of Geophysics* Article ID 879530, 6 pp. DOI: 10.1155/2014/879530.
- Ramakrishnan, A., Blaney, L., Kao, J. et al. (2015) Emerging contaminants in landfill leachate and their sustainable management. *Environ Earth Sci* 73, 1357–1368. DOI: 10.1007/s12665-014-3489-x.
- Renou, S.; Givaudan, J.G.; Poulain, S.; Dirassouyan, F.; Moulin, P. (2008) Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials* 150, 468–493.
- Reyes-López, J.A.; Ramírez-Hernández, J.; Lázaro-Mancilla, O.; Carreón-Díazconti, C.; Martín-Loeches Garrido, M. (2008) Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México. *Waste Management* 28, S33–S39.
- Shi, Lei.; Chen, Huixin.; Meng, Huilin.; Cheng, Rong.; Dai, Jinguo.; Zheng, Xiang.; Zhang, Zhenxing. (2021) How environmental policy impacts technology adoption: A case of landfill leachate. *Journal of Cleaner Production* 310, 127484.
- Ugbor, C.C.; Ikwuagwu, I.E.; Ogboke, O.J. (2021) 2D inversion of electrical resistivity investigation of contaminant plume around a dumpsite near Onitsha expressway in southeastern Nigeria. *Sci Rep* 11, 11854, DOI: 10.1038/s41598-021-91019-3.
- Zhan, Lt., Xu, H., Jiang, Xm. et al. (2019) Use of electrical resistivity tomography for detecting the distribution of leachate and gas in a large-scale MSW landfill cell. *Environ Sci Pollut Res* 26, 20325–20343. DOI: 10.1007/s11356-019-05308-6.