



Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán

Isabel Israde-Alcántara^{1,*}, Otoniel Buenrosto-Delgado^{1,2}, Víctor Hugo Garduño-Monroy¹, Víctor Manuel Hernández-Madrigal¹, Erna López Granados¹

¹ Departamento de Geología y Mineralogía, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Edif. U, Ciudad Universitaria. 58060 Morelia, Michoacán.

² Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Ciudad Universitaria. 58060 Morelia, Michoacán.

* Email: aisrade@zeus.umich.mx

Resumen

La Cuenca de Cuitzeo forma parte de la macro-cuenca del Lerma. Cubre un área de 4,000 km² que es ocupada por más de 1,100,000 habitantes que viven en una depresión de origen tectónico que ha sido rellenada por depósitos volcanosedimentarios. Los paisajes están conformados por lomeríos pequeños, edificios y mesetas volcánicas, y depósitos de origen fluvio-lacustre. Los sitios de vertido de basura han operado sin un diseño de ingeniería que permita el control de lixiviados y de biogases generados por las actividades urbanas, agrícolas e industriales; estas últimas incluyen residuos peligrosos asociados con industrias de pequeña escala establecidas en la cuenca de Cuitzeo. El tiradero más grande, localizado al este de la ciudad de Morelia, funciona desde 1985 y produce 700 toneladas por día de residuos que se integran a un total de 562,000 toneladas en la cuenca. Los resultados indican que la mayoría de los sitios de confinamiento carecen de un substrato impermeable siendo también la porosidad del substrato relativamente alta, ya que consiste en flujos de lava muy fracturados, depósitos de caída no consolidados, diatomitas y depósitos fluviales. Todas estas litologías son vías de migración de aguas contaminadas hacia la cuenca. El presente trabajo geológico-ambiental permite comprender las características de la Cuenca de Cuitzeo, con el objeto de establecer métodos de ingeniería y de gestión para minimizar el impacto ambiental y de salud pública de los tiraderos en zonas urbanas y periurbanas.

Palabras clave: Cuenca de Cuitzeo, tiraderos, residuos urbanos, ambientes fluvio-lacustres, lavas fracturadas.

Abstract

The Cuitzeo basin is part of the Lerma basin, located in west central Mexico. It covers an area of ca. 4,000 km² that is occupied by over 1,100,000 inhabitants living in a tectonic basin where the main infill consists of volcano-sedimentary materials. Landforms comprise small hills, volcanic edifices and plateaus, and tilted blocks of fluvio-lacustrine sediments. Waste disposal sites are operating without engineering design plans that would allow for the control of leachates and bio-gas generated by the urban, agricultural and industrial activities, which in this last case include hazardous waste associated with small-scale industries established in the Cuitzeo basin. The biggest dump, located east of the city of Morelia, has been operating since 1985 and admits 700 tons of waste per day that have added to a total of around 562,000 tons of solid wastes already deposited in the basin. The results of this study indicate that most of the sites lack impermeable subsurface strata. The porosity of the subsurface strata at many of the sites is relatively high, since it consists mainly of highly fractured basaltic lava flows, unconsolidated volcanic fall deposits, diatomites and fluvial deposits. All these lithologies provide ways for the migration of contaminated waters towards the basin. This article aims to provide a better understanding of the characteristics of the Cuitzeo basin in order to establish the engineering methods for minimizing the environmental and public health impact in urban and periurban areas.

Key words: Cuitzeo Basin, dumps, urban residues, fluvio-lacustrine environments, fractured lavas.

1. Introducción

En la cuenca de Cuitzeo habitan más de un millón de personas, en la zona de mayor desarrollo industrial del estado

de Michoacán. A pesar de ello, la mayoría de los municipios que integran la cuenca requieren apoyo gubernamental por sus altos índices de pobreza y marginación (SEDESOL, 2001), cuya economía está sustentada principalmente en la pesca

y la agricultura en escala menor. No obstante, debido a los bajos recursos económicos, la generación de residuos rebasa la capacidad de los ayuntamientos para depositar de forma adecuada los residuos sólidos (Buenrostro e Israde, 2003). En febrero del 2008, se detectaron más de 150 vertederos clandestinos en las cercanías de tenencias y caminos rurales (León-González, 2008).

La geología es una de las principales limitantes en esta cuenca para ubicar sitios aptos para rellenos sanitarios, por el hecho que se encuentran rocas volcánicas fracturadas, depósitos fluviolacustres y aluviales, que constituyen factores negativos para ello. El acuífero superficial que pudiera ser afectado por los residuos está constituido por facies granulares o bien por andesitas fracturadas en un esquema de fallas que configuran la morfología de las riveras del Lago de Cuitzeo, así como sus manantiales asociados.

En el centro de México son comunes los tiraderos localizados en substratos volcánicos y cuencas lacustres, tal es el caso del confinamiento de Santa Catarina en la subcuenca de Chalco, localizado al sureste de la ciudad de México que muestra evidencia del deterioro del acuífero subterráneo (González-Morán, 2002; Krivochieva y Chouteau, 2003).

La problemática social y política de la cuenca representa otra limitante para minimizar el impacto ambiental y a la salud pública de los tiraderos, ya que no existen cuadros técnicos capacitados en su gestión en la mayoría de los 21 municipios que integran la cuenca.

En el presente trabajo se analiza de forma preliminar la distribución, volumen y composición de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, con el objeto de proponer medidas para su adecuado confinamiento urgente.

2. Materiales y métodos

Se realizó un recorrido para caracterizar la geología superficial de los tiraderos de la cuenca y distinguir los factores de riesgo geológicoambiental, cada uno de ellos con base en la cartografía geológica de la región (Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, en prensa).

Paralelamente, se efectuó un levantamiento topográfico para determinar el volumen de los basureros. En las localidades de Uriangato, Indaparapeo, Zinapécuaro, Tarímbaro y Morelia, se calculó el volumen del depósito de basura, comprendido entre el nivel del suelo natural y una superficie superior definida por el depósito de basura. Ambas superficies se representaron a través de respectivos modelos digitales del terreno (MDT), a partir de coordenadas X, Y, y Z de un conjunto de puntos distribuidos homogéneamente en el área a modelar. El MDT del nivel natural del suelo fue determinado a partir de puntos perimetrales de la base del depósito de basura, por lo que la mayor parte de la superficie digital es una interpolación de esos puntos, mientras que el MDT del depósito de basura considera una mayor cantidad de puntos. Lo anterior se justifica debido a que en el primero la superficie es plana, y se requieren al menos cuatro puntos para el modelado; en tanto que en el depósito de basura, su superficie es muy irregular y demanda un gran número de puntos para su representación adecuada.

Los volúmenes de las superficies del depósito de basura y del terreno natural, se calcularon con respecto a un *datum* o nivel de referencia (Figura 1), a través de la doble integral (ec. 1) de la función definida por el respectivo MDT. El valor de dicha integral o volumen, se obtuvo del promedio de resultados obtenidos con las tres siguientes reglas de aplicación múltiple: trapezoidal, Simpson 1/3 y Simpson 3/8 (Press et al., 1988). El volumen total se extrajo de la diferencia de ambos volúmenes (ec. 2). Todo lo anterior, fue calculado a través de los respectivos comandos del programa SURFER 8.

$$V = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(x,y) dx dy \quad (1)$$

$$V_t = V_b - V_{tn} \quad (2)$$

Donde:

V = Volumen (m³)

V_t = Volumen total (m³)

V_b = Volumen desde el *datum* hasta la superficie del basurero (m³)

V_{tn} = Volumen desde el *datum* hasta el terreno natural (m³)

Una vez cubicados los tiraderos, se tomaron muestras de residuos sólidos utilizando el método de cuarteo, con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-15-1985 (SECOFI, 1985). También, se determinó su peso volumétrico de acuerdo con la norma NOM-AA-19-1985 (SECOFI, 1985) durante el periodo de estiaje (octubre) y siempre se tomaron las muestras de los residuos depositados recientemente, al ser vertidos por el camión recolector para evitar la pepena (separación de subproductos con valor de uso o comercial) y que fuese lo más real posible a la composición de los residuos depositados.

3. Marco Geológico Regional

El paisaje de la Cuenca de Cuitzeo forma parte de un conjunto de depresiones lacustres que se encuentran a lo largo de una franja E-W del centro de México y que están infrayacidas por la sucesión oligo-miocénica de Mil Cumbres, y cubiertas por el vulcanismo de la Faja Volcánica Mexicana (FVM). En la cuenca se observan lomas alargadas que forman parte de un sistema regional de fallas E-W potencialmente

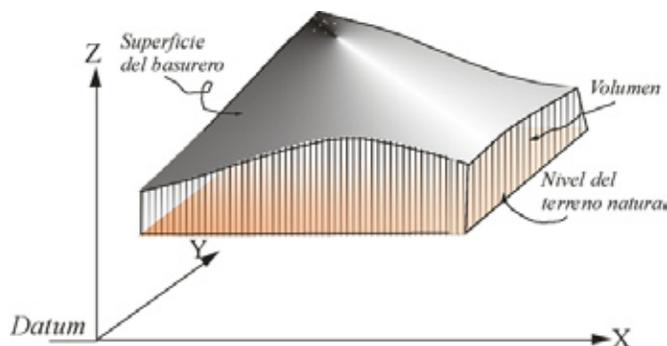


Figura 1. Determinación de los volúmenes de basura. El volumen de basura calculado es el comprendido entre la superficie del depósito y el terreno natural.

sísmicas (Figura 2). Las lomas presentan un hundimiento hacia el norte y un basculamiento de 5° a 30° hacia el sur, con saltos de falla de más de 200 m en la zona sur de la ciudad de Morelia (Falla La Paloma).

Estructuralmente, la Falla de Tzitzio – Valle de Santiago es importante, ya que en ella se observa un desplazamiento lateral derecho en el lago en los sectores oriente y poniente. Al este conforma un graben tendiente a simétrico, mientras que al oeste conforma un semigraben con bloques basculados hacia el sur.

Las secuencias más antiguas conforman rocas andesíticas muy fracturadas, correspondientes al vulcanismo del Complejo de Mil Cumbres de edad oligo-miocénica, en que se observan estratovolcanes y calderas de composición andesítica, dacítica y riolítica, como la denominada “cantera de Morelia” (Figura 2, litologías de la 16 a la 25). Estas rocas se encuentran sobreyacidas por flujos piroclásticos color rosa (al norte de Morelia, en Tarímbaro-Copándaro, Álvaro Obregón, y en Peña del Panal). Éstos, a su vez, son cubiertos por secuencias de terrígenos de origen lacustre o fluviolacustre pertenecientes al Mioceno-Pleistoceno. El vulcanismo corona esta secuencia con una emisión de pómez que termina con el antiguo lago de Cuitzeo. Los afloramientos de flujos piroclásticos mal consolidados, con depósitos aluviales, son comunes en los tiraderos de Álvaro Obregón, Tájaro, Cuitzeo y Santa Ana Maya.

Estas unidades volcánicas están cubiertas en la zona de los tiraderos de Charo e Indaparapeo por depósitos arcillosos de origen lacustre, sobreyacidos por diatomitas que, a su vez, están cubiertas por depósitos fluviolacustres y depósitos de caída del Mioceno-Pleistoceno (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999; Figura 2).

Hacia el oeste y norte del Lago de Cuitzeo y hacia el oeste de Morelia aflora el vulcanismo de la FVM. Destacan los volcanes en semi-escudo de El Águila y Quinceo-Las Tetillas, los cuales están conformados por un ciclo eruptivo compuesto por alternancias de productos efusivos y explosivos. Sus bases van más allá de una decena de kilómetros y sus pendientes son muy suaves. Sobre el edificio descansan conos parásitos andesítico-basálticos de tipo estromboliano.

También se encuentra el vulcanismo monogenético del Corredor Tarasco, que se compone de domos, conos cineríticos, conos de lava y derrames con alturas bajas. Resaltan en la cuenca los pequeños conos de Queréndaro que surgieron hace aproximadamente 700,000 años (Pradal y Robin, 1994). Hacia el poniente, el paisaje está caracterizado por el vulcanismo del Holoceno, en Capula y Copándaro-Huaniqueo. En la región sur de la cuenca, el vulcanismo culmina con una emisión de pómez que termina con el paleolago de Charo y con lavas históricas provenientes de Quinceo-La Tetillas. Todos estos productos sobreyacen o se intercalan con las secuencias fluviolacustres y lacustres del Pleistoceno-Holoceno del Lago de Cuitzeo (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). En el sector oriente del Lago de Cuitzeo, se observan productos volcánicos de la Caldera de Los Azufres, conformada por rocas andesíticas (Figura 2, litologías 4 a 9), ignimbritas con edad <4 Ma y domos riolíticos con edad <1

Ma, cuyos depósitos de obsidiana fueron explotados por los antiguos purépechas. La siguiente secuencia volcánica está compuesta por domos dacíticos y vulcanismo monogenético de 700,000 años, representada por los volcanes El Mozo y San Andrés (Pradal y Robin, 1994). Ésta es sobreyacida por los domos riolíticos de La Hierbabuena, con edades <300,000 años.

Dividiendo estructuralmente al Lago de Cuitzeo en dos bloques, aquél perteneciente a los productos volcánicos de la Sierra de Mil Cumbres y secuencias fluviolacustres y lacustres del Mioceno-Pleistoceno tardío, de los depósitos más recientes de la FVM, se observa la planicie del dren La Cinta-Buenavista, en el Cuaternario, la cual pudo haber sido exorreica, una vez que se rebasaba la cota de 1,800 metros, ampliando el espejo del vaso lacustre hacia Yuriria durante fases de actividad tectónica y un clima más húmedo.

Hidrológicamente, en los tiraderos más cercanos al lago y en cotas menores a 1,830 m, los niveles estáticos de los acuíferos se encuentran a ~15 m de profundidad, principalmente al sur del lago de Cuitzeo. En éste, el acuífero más somero se encuentra albergado por materiales granulares (fluviolacustres), y presenta espesores promedio de 35 m.

4. Resultados

La generación de residuos sólidos en todos los municipios es muy similar y se conforma por plásticos y empaques, lo que sugiere una gran similitud entre los patrones de consumo de las poblaciones predominantemente rurales con los de áreas urbanas (Buenrostro e Israde, 2003). En la mayoría de los tiraderos, se observó la mezcla de residuos domésticos con los clínicos (Figura 3b), además del escurrimiento de lixiviados hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneas, como son los casos de los tiraderos de Zinapécuaro y Morelia (Figura 3a-d). En estos dos últimos se detectaron vertidos industriales y hospitalarios.

En todos los tiraderos es común la proliferación de fauna indeseable y emisión de gases, en ocasiones tóxicos, como metano y lixina generados en las 34 hectáreas del tiradero de Morelia. Dicho tiradero funcionó en el mismo punto desde 1984 hasta el 2007, y sus residuos están en proceso de compactación. Durante la incineración de residuos, se producen además malos olores y dispersión de partículas a través de la acción eólica. Tal es el caso del tiradero de Copándaro que se encuentra en combustión continua (Figura 3e). También, se detectaron tiraderos clandestinos en las márgenes de las carreteras (Zinapécuaro y Tájaro, Figura 3f), en brechas, y en zonas de cárcavas y cañadas que presentan marcada erosión (Charo, Figura 3g).

Es importante mencionar el impacto que está causando el tiradero de Santa Ana Maya, que se encuentra en la orilla del margen centro-norte del Lago de Cuitzeo, en que la basura es retenida por los tulares de la orilla del lago (Figura 3h).

En el estudio de los volúmenes de basura depositados en los distintos sectores de la cuenca (Tabla 1, Figuras 4 y 5), resalta que los municipios que más residuos sólidos producen son aquellos en donde se encuentra la densidad demográfica más

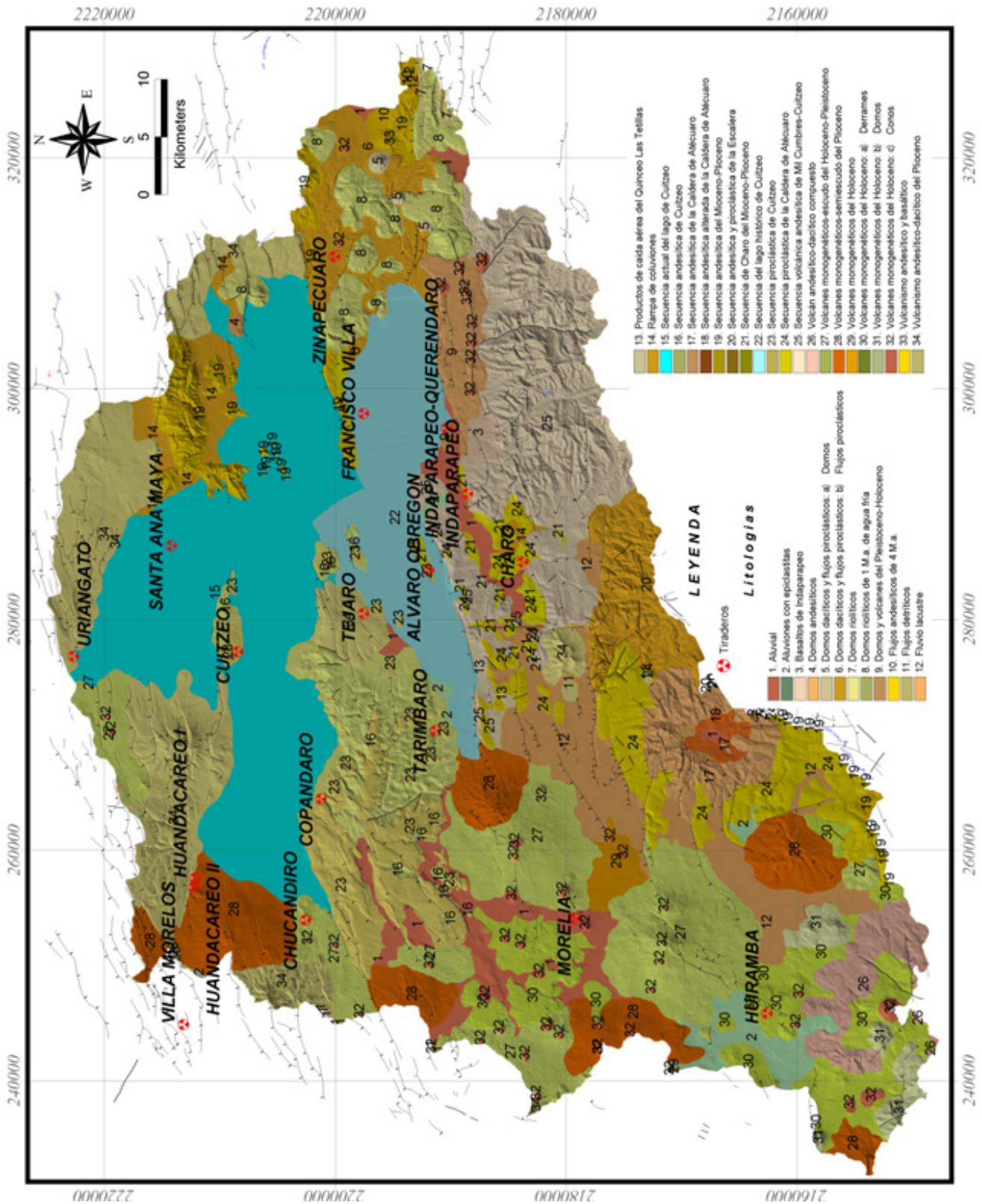


Figura 2. Mapa de localización de tiraderos con respecto a la litología de la Cuenca de Cuitzeo (modificado de Garduño-Monroy e Israde-Alcántara, en prensa)



Figura 3. Índice de imágenes tomadas el 22 de diciembre del 2007, excluyendo la del tiradero de Morelia que fueron tomadas en agosto del 2004. a) Charcas de lixiviados que escurren hacia fracturas. b) Detalle de los escurrimientos hacia fracturas en periodo de lluvias y de estiaje. c) Residuos clínicos de la región de Morelia. d) Escurrimiento de lixiviados del tiradero de Zinapécuaro. e) Combustión constante de Copándaro. f) Tiradero en la orilla de la carretera de Téjaro. g) Tiradero de Charo que deposita en barrancos conformados por secuencias fluvio lacustres. h) Tiradero de Santa Ana Maya que invade al lago de Cuitzeo entre tulares. i) Tiradero de Uriangato. j) Tiradero en depósitos fluviolacustres de Indaparapeo. k) Tiradero de Álvaro Obregón. l) Tiradero de Tarímbaro atraviesa ductos de combustible. m) Tiradero de Huandacareo mostrando residuos porcinos.

f



g



h



i



j



k



l



m



Figura 3. Continuación

alta. Por ejemplo, en la región de Morelia la generación diaria es de 700 toneladas, conformando un volumen aproximado de 2,400,000 m³ de residuos. Esa área concentra cerca del 85% de los residuos sólidos de la cuenca, e integra un 72% de las fuentes residenciales, el 83% de actividades industriales, 82% del ramo comercial, el 90% corresponde a fuentes especiales, institucionales y de servicios, y alrededor del 74% proviene de actividades de construcción (Buenrostro e Israde, 2003). Le sigue el municipio de Uriangato con 87,000 m³ (Figura 4, Tabla 1). Estos volúmenes varían considerablemente, ya que se ha hecho común el proceso de incineración de residuos. El mayor porcentaje de materiales que son incinerados son

plásticos, con el fin de maximizar el aprovechamiento del tiradero.

Cabe resaltar que existe una barrera impermeable en los tiraderos de Indaparapeo y Álvaro Obregón (Figura 3j y k), conformada por las arcillas provenientes del antiguo Lago de Cuitzeo (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). En estos sectores, los materiales impermeables no presentan estratos de espesor continuo, ya que cambian de facies a depósitos fluviales o con diatomitas. Estas dos últimas litologías conforman sedimentos muy porosos y permeables (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Otro substrato que no favorece a los tiraderos es el de los productos volcánicos

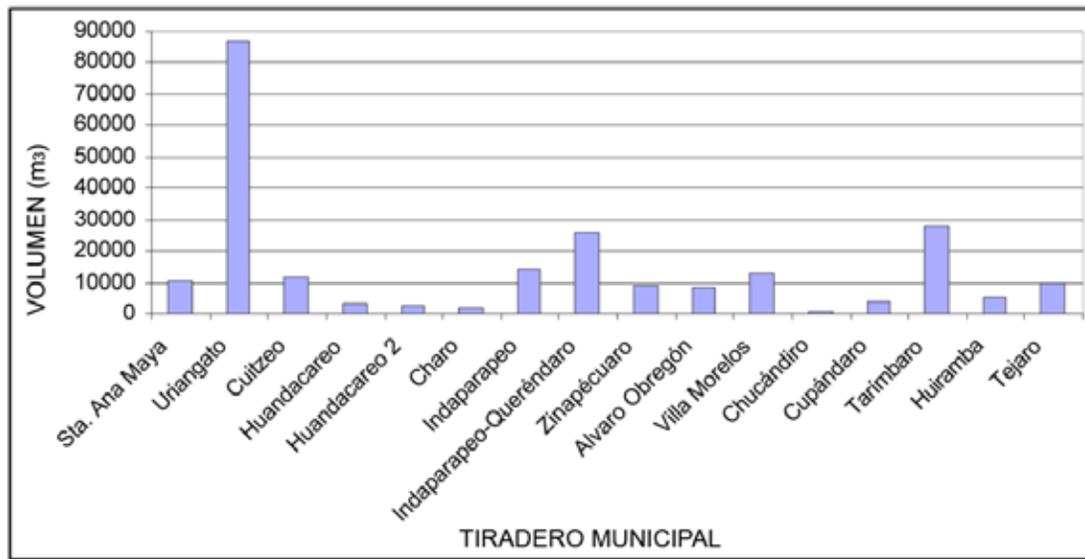


Figura 4. Gráfica de volumen de basura por localidad, sin considerar el tiradero de Morelia.

Tabla 1. Localización en la proyección UTM y volúmenes generados por los principales tiraderos de basura de la Cuenca de Cuitzeo.

ID	COORDENADAS DEL TIRADERO		POBLACION	AREA (m ²)	ESPESOR (m)	VOLUMEN (m ³)
	X	Y				
1	286,428	2,214,201	Sta. Ana Maya	17,007	0.6	10,204.2
2	276,852	2,222,666	Uriangato	24,400	-	87,018.2
3	277,219	2,208,424	Cuitzeo	11,036	-	11,897.5
4	257,618	2,212,123	Huandacareo	6,899	0.45	3,104.7
5	256,833	2,212,259	Huandacareo 2	3,480	0.8	2,784.2
6	284,993	2,183,775	Charo	979	2	1,957.9
7	290,912	2,188,542	Indaparapeo	8,423	-	14,253.1
8	296,615	2,190,340	Indaparapeo-Queréndaro	13,104	2	26,208.2
9	311,469	2,200,053	Zinapécuaro	4,969	-	9,258.9
10	284,295	2,191,894	Alvaro Obregón	10,796	0.8	8,636.9
11	244,911	2,213,138	Villa Morelos	6,413	2	12,825.5
12	253,983	2,202,558	Chucándiro	946	0.8	756.6
13	264,471	2,201,235	Copándaro	2,605	1.5	3,908.2
14	270,390	2,191,340	Tarímbaro	39,780	-	27,918.7
15	245,873	2,162,607	Huiramba	5,508	0.9	4,957.4
16	254,102	2,179,276	Morelia	192,737	-	2,413,425.7
17	280,519	2,192,375	Tejaro	3,200	3	9,600
18	297,868	2,197,553	Fco. Villa quemado	-	-	-

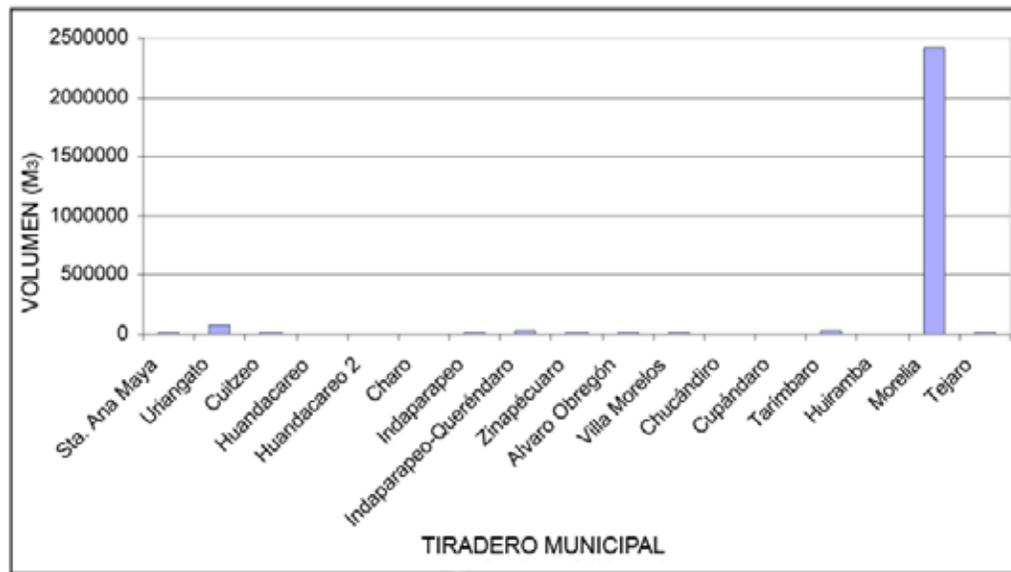


Figura 5. Gráfica de volumen de basura por localidad, considerando el tiradero de Morelia, nótese la gran diferencia entre el volumen de éste último y el resto de tiraderos.

que pueden consistir en conos de arena volcánica y lavas fracturadas de distinta composición. El tiradero de Morelia, así como la mayoría de tiraderos de la región (Figura 3b y c) presentan dicho substrato. Numerosos tiraderos se encuentran sobre terrenos agrícolas, promoviendo la contaminación de tierras fértiles, cultivos aledaños y aguas de riego, como en los casos de Indaparapeo, Queréndaro, Copándaro, Francisco Villa, Álvaro Obregón y Tejaro.

A pesar de que en la cuenca no existen antecedentes de actividades industriales a gran escala, se registran vertidos de estos residuos en las regiones de Morelia, Uriangato y Zinapécuaro. Ello puede contribuir a que los lixiviados generados presenten residuos peligrosos, entre ellos metales pesados, subproductos de actividades industriales, que pueden migrar hacia zonas más bajas a través de fracturas. Ello provoca que el acuífero sea especialmente vulnerable, siendo este el caso del tiradero de Morelia (Istrade *et al.*, 2005).

Los residuos pueden migrar también por medio de arroyos intermitentes en cañadas, permitiendo el arrastre y migración de líquidos y sólidos, como se observa en los tiraderos de Zinapécuaro y Charo (Figura 3g).

Otra problemática destacable es la de Tarímbaro, cuyo tiradero atraviesa ductos de combustible de Petróleos Mexicanos que obviamente no respetan el derecho de vía de 20 m especificada en la norma 083, lo que puede conllevar severas consecuencias si el tiradero entra en combustión y existieran fugas en estos ductos (Figura 3l).

El vertido de ganado muerto, proveniente sobre todo de la industria porcina, en el tiradero de Huandacareo y Chucándiro es continuo. Considerando la afectación a la salud por los organismos patógenos desprendidos se requiere, por lo tanto, como acción inmediata la prohibición de dicha actividad (Figura 3m).

El tiradero de Huiramba se asienta en un substrato de rocas volcánicas fracturadas en un entorno de vegetación de

encino, si bien el vertido en este sector no representa grandes volúmenes y generalmente contiene residuos urbanos.

Como se observa en la Figura 2, en el centro de esta cuenca se ubica el Lago de Cuitzeo, que capta todos los drenajes naturales y antrópicos, lo que incide en el deterioro ambiental de la zona. La disposición inadecuada de los residuos sólidos afecta a suelo y agua, que son los principales recursos en los cuales se basa el desarrollo económico de la región.

5. Conclusiones

A pesar del carácter preliminar de este estudio, pues cada sitio requiere estudios geofísicos, geotécnicos y geohidrológicos propios, es evidente la necesidad de localizar sitios de disposición final que cumplan con la norma vigente.

En la cuenca de Cuitzeo no existe ningún sitio de confinamiento que cumpla con la norma vigente. Sin embargo, existen substratos arcillosos al norte de la cuenca (Álvaro Obregón) y sur del lago de Cuitzeo (occidente de Charo) que pueden ser factibles para realizar estudios detallados que permitan la integración de rellenos intermunicipales. Esta estrategia eficientizaría los recursos asociados a la gestión en el manejo del vertido de residuos urbanos e industriales de la región. Asimismo, las autoridades competentes deben contemplar el entrenamiento del personal de cada ayuntamiento con proyección a futuro de los volúmenes y sistemas de tratamiento de acuerdo con la problemática de las localidades.

Agradecimientos

A la CNA, por la información geohidrológica consultada. Isabel Israde agradece a sus hijas Tania, Chantal y Camila por su apoyo para la conclusión de este trabajo. Al Dr. Armando García Palomo por la invitación para integrar nuestro manuscrito en este número.

Referencias bibliográficas

- Buenrostro, O., Israde, I., 2003. La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), 161-169.
- Garduño-Monroy, V.H., Israde-Alcántara, I., en prensa. Origen y evolución geológica del lago de Cuitzeo, en: Cram, S., Israde, I., Mendoza, M. (eds.) *Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: Universidad Nacional Autónoma de México – Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- González-Morán, T., 2002. Modelo funcional del proceso de alteración del agua subterránea en las cercanías del basurero de Santa Catarina, Chalco, México: *Revista Geofísica*, 57, 111-124.
- Israde-Alcántara, I., 1995. Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Mexicano; stratigrafia et evoluzione sedimentaria basata sulle diatomee: Milano, Italia, Università degli studi de Milano, tesis de doctorado, 254 p.
- Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V.H., 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (Central wester Michoacán, Mexico): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 15(1-3), 209-227.
- Israde-Alcántara, I., Buenrostro, O., Carrillo-Chávez, A., 2005. Geological characterization and environmental implications of the Placement of the Morelia Landfill, Michoacán, Central Mexico: *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55(6), 755-764.
- Krivochieva, S., Chouteau, M. 2003. Integrating TDEM and MT methods for characterization and delineation of the Santa Catarina aquifer (Chalco Sub-Basin, Mexico): *Journal of Applied Geophysics*, 52, 23-42.
- León-González, G., 2008. Se han detectado más de 150 tiraderos clandestinos de basura en Morelia: *La Jornada, Michoacán*, 27 de febrero de 2008, <http://www.lajornadamichoacan.com.mx/2008/02/27>.
- Pradal, E., Robin, C., 1994. Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 201-215.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T., 1988. *Numerical recipes: The art of scientific computing*: Cambridge, Cambridge University Press, Annual Technical Report.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SECOFI), 1985. *Relación de normas oficiales mexicanas, aprobadas por el comité de protección al ambiente: México, Contaminación del Suelo*, 104 p.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2001. *Programa Nacional de Atención a Regiones Prioritarias: Diario Oficial de la Federación* 15 de marzo de 2001, México.

Manuscrito recibido: 10/08/2008

Manuscrito corregido recibido: 14/10/2008

Manuscrito aceptado: 5/11/2008