

MEDICIÓN DE pH Y CUANTIFICACIÓN DE METALES PESADOS EN LOS LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO MÁS GRANDE DE LA ZONA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Measurement of pH and heavy metals quantification in leachates from the biggest landfill of the metropolitan area of Mexico City

F Robles-Martínez ✉, Y Morales-López, AB Piña-Guzmán, O Espíndola-Serafín, LR Tovar-Gálvez, G Valencia-del Toro

(FRM)(YML)(ABPG)(GVT) Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI)- Instituto Politécnico Nacional (IPN). Avenida Acueducto de Guadalupe S/N, Barrio La Laguna Ticomán, Delegación Gustavo A. Madero, C.P. 07340 México D.F. froblesm@ipn.mx

(OES) CONAGUA, Dirección Infraestructura Hidroagrícola

(LRTG) Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIEMAD-IPN)

Artículo recibido: 21 de noviembre de 2008, **aceptado:** 18 de abril de 2011

RESUMEN. El relleno sanitario Bordo Poniente en el año 2010 recibía aproximadamente 13 400 t d⁻¹ de residuos sólidos urbanos (RSU). Este relleno sanitario ha sido operado en cuatro etapas, en diferentes periodos de tiempo; la primera etapa inició operaciones en 1985. Las macroceldas construidas en las etapas I, II y III no cuentan con geomembrana, mientras que en las macroceldas de la etapa IV se colocó esta película plástica y actualmente es la única etapa en operación. En el presente trabajo se midió el pH y la concentración de Pb, Ni, Cr, Ag, Cd, Hg, Se y Ba en los lixiviados de las cuatro etapas que componen el relleno sanitario Bordo Poniente, y se realizaron análisis de varianza de uno y dos factores a los resultados obtenidos para determinar si había diferencia entre las celdas donde se colocó la geomembrana en relación a aquellas que no contaban con esta película plástica. La concentración de metales pesados se comparó con los límites máximos establecidos en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005. En los puntos muestreados se encontró que las concentraciones de los elementos analizados no fueron mayores a los límites establecidos por la norma oficial mexicana. Los análisis estadísticos mostraron que no hubo diferencia significativa en el pH y en la concentración de metales relacionada con la presencia o ausencia de geomembrana.

Palabras clave: Rellenos sanitarios, residuos sólidos urbanos.

ABSTRACT. In 2010, the landfill Bordo Poniente received approximately 13 400 t d⁻¹ of urban solid wastes. This landfill has operated in four phases, at different times; the first phase started operations in 1985. The macrocells built in phases I, II and III don't have a geomembrane, while those of phase IV have this plastic film and are currently the only ones in operation. In this study, the pH and the concentration of Pb, Ni, Cr, Ag, Cd, Hg, Se and Ba were recorded in the leachates of the four phases of the landfill Bordo Poniente. One and two factor analyses of variance were applied to the results obtained to determine differences between the cells with and without a geomembrane. The heavy metals concentrations were compared with the maximum levels established in the norm NOM-052-SEMARNAT-2005. The results recorded for the sampling sites indicated that the concentrations of the analysed elements were lower than those established by the Mexican official norm. The statistical analyses showed no significant difference in the pH and the concentration of metals in relation to the presence/absence of a geomembrane.

Key words: Landfills, urban solid wastes.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que se pre-

sentan en la Ciudad de México, es la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU), que en promedio alcanzan la cantidad de 13 400 t diarias

Tabla 1. Características de las cuatro etapas del relleno sanitario "Bordo Poniente".
Table 1. Characteristics of the four phases of the "Bordo Poniente" landfill.

Etapa	Superficie ocupada para relleno (Has)	Periodo de operación	Colocación de geomembrana
I	65	15/02/1985 a 25/06/1992	NO
II	75	31/07/1988 a 30/11/1997	NO
III	95	01/08/1991 a 05/05/1997	NO
IV	375	01/02/1995 a la fecha	SI

(SMA 2009). El uso del relleno sanitario, ha sido el método más utilizado de disposición final para los RSU en la Ciudad de México, lo anterior se ha debido principalmente al factor económico, ya que tanto la inversión inicial como los costos reales de operación son inferiores a otros sistemas de disposición o tratamiento de RSU (JICA 1999). Sin embargo, los rellenos sanitarios requieren una operación eficiente para evitar contaminar su entorno.

El relleno sanitario Bordo Poniente, se encuentra ubicado en el noreste de la Ciudad de México, en la zona donde alguna vez se encontró el lago de Texcoco. Este sitio inició operaciones en febrero de 1985 y actualmente es el único relleno sanitario que da servicio a la Ciudad de México. La operación del relleno se ha llevado a cabo en cuatro etapas, cada etapa ocupa un área diferente (Tabla 1). En las etapas I, II y III las macroceldas fueron operadas sin geomembrana, porque en el momento de la apertura no había regulación en México para la operación de estos sitios; en las macroceldas de la etapa IV (última etapa) se colocó dicha cubierta plástica para poder cumplir con la normatividad vigente (NOM-083-SEMARNAT-2003).

La presencia o ausencia de la geomembrana en las diferentes etapas lleva a suponer que podría haber una diferencia significativa en los valores de pH, debido a que en ausencia de dicha película plástica, el lixiviado entraría en contacto con el suelo natural donde se encuentra el relleno sanitario. El suelo del antiguo lago de Texcoco, es considerado casi único en el mundo, debido a sus características fisicoquímicas, su gran compresibilidad, alto contenido de agua, plasticidad, baja resistencia al esfuerzo cortante, impermeabilidad y alta salinidad-sodicidad (Cruickshank-García 1998), esto último contribuye a que el suelo presente un pH de 10 y una conduc-

tividad de $6.9 \text{ mmhos cm}^{-1}$ (Murillo-Torres et al. 2002). La concentración de sales en el agua subterránea del ex-lago de Texcoco, es dos veces mayor a el agua de mar (Cruickshank-García 1998). La textura varía de franca a franca-arcillosa (Murillo-Torres et al. 2002).

Todo relleno sanitario o sitio de disposición final genera lixiviados, los cuales se forman principalmente por la percolación de las aguas meteóricas a través de la masa de residuos, sin embargo, en la mayoría de los casos los RSU contienen cantidades de agua suficientes para generar lixiviados, aún sin la entrada de aguas meteóricas (Robles-Martínez 2008). Los lixiviados contienen microorganismos y sustancias orgánicas e inorgánicas como los metales pesados, estos últimos pueden encontrarse disueltos o en mayor proporción formando coloides liofílicos o liofóbicos (Baun & Christensen 2004). Los lixiviados de rellenos sanitarios son considerados en la normatividad mexicana como residuos peligrosos (NOM-052-SEMARNAT-2005), por lo que es necesario realizar su caracterización para conocer el potencial contaminante en cada sitio de disposición, pues los lixiviados constituyen un factor de riesgo sanitario, ya que pueden contaminar suelos, aguas superficiales y/o subterráneas. También resulta necesario conocer las características de los lixiviados para llevar a cabo tratamientos adecuados y disminuir el impacto de los lixiviados al medio. Los suelos alcalino-sódicos pueden modificar las características fisicoquímicas de los lixiviados principalmente en las zonas donde no se colocó la geomembrana, debido a que al aumentar la alcalinidad, los metales pesados pueden precipitar en forma de carbonatos e hidróxidos quedando no biodisponibles y sedimentados. El objetivo del presente estudio fue realizar el monitoreo de pH y la cuantificación de metales en

Tabla 2. Puntos de muestreo en el relleno sanitario "Bordo Poniente".
Table 2. Sampling sites in the "Bordo Poniente" landfill.

Punto de muestreo	Etapa I	Punto de muestreo	Etapa II	Punto de muestreo	Etapa III	Punto de muestreo	Etapa IV
1	C	7	C	13	C	19	C
2	C	8	C	14	C	20	C
3	C-d	9	C	15	C	21	C
4	Es	10	Es	16	Es	22	C
5	Es	11	Es	17	Es	23	C
6	P	12	P	18	P	24	C
						25	C-d
						26	Es
						27	En-ex
						28	P

C= Cárcamo, C-d = Cárcamo derrumbado, Es= Esgurrimiento, En-ex= Encharcamiento exterior, P= Pozo.

los lixiviados producidos en cada una de las etapas del relleno sanitario Bordo Poniente en la Ciudad de México para determinar su potencial contaminante de acuerdo con lo establecido por la Norma Oficial Mexicana (NOM-052-SEMARNAT-2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

Se muestrearon 28 puntos en las cuatro etapas del relleno sanitario Bordo Poniente, los puntos muestreados fueron en cárcamos, escurrimientos y pozos de control (Tabla 2). La toma de muestras se realizó en dos épocas del año: época de estiaje durante los meses de enero-febrero (denominado como E-E) y época de lluvia durante los meses de agosto-octubre (denominado como E-LL), ambos muestreos fueron en el año 2004. En las primeras tres etapas, para el caso de los cárcamos, se tomaron muestras en tres puntos diferentes. En la etapa IV el muestreo se llevó a cabo en siete cárcamos debido a que la superficie de esta etapa es mayor que la superficie ocupada por las tres primeras etapas. Los cárcamos están situados en la periferia de cada una de las etapas del relleno sanitario. Para todas las etapas se tomaron muestras de dos sitios donde se tuviera escurrimiento de lixiviados fuera de las celdas y de un pozo de control, estos últimos se encuentran ubicados en la cresta de las celdas.

La toma de muestras se llevó a cabo sigui-

endo el proceso establecido en la norma NMX-AA-003-1980 (Aguas residuales-muestreo) y de acuerdo al manual de métodos normalizados APHA *et al.* (1998) adecuándolo a las características del sitio.

Los envases empleados en la toma de muestras fueron de polietileno de alta densidad, los cuales se lavaron previamente con una solución de HNO₃ al 2% para eliminar -si fuera el caso- trazas de metales pesados.

Los parámetros que se determinaron de cada muestra de lixiviado, fueron el pH y el contenido de metales como Pb, Ni, Cr, Ag, Cd, Se, Ba y Hg. Aunque el Se y el As no son metales pesados, se determinó también la concentración de estos elementos, debido a que así lo establece la NOM-52-SEMARNAT-2005.

Determinación de metales pesados

Con el objetivo de degradar la materia orgánica presente en las muestras, y así facilitar la solubilización de los metales, cada una de las muestras se sometió a una digestión con HNO₃ concentrado. Para la digestión, se colocaron 43 mL de muestra en un vaso de polietileno y se le agregaron 5 mL de HNO₃, después de 15 min los vasos se colocaron en sus celdas y se introdujeron en un horno (Multiware, Paar Physica). La digestión se llevó a cabo a 165 °C y 30 bar con una potencia de 700 watts (método EPA 3015).

Después de digeridas las muestras, éstas se

Tabla 3. Valor de pH de los lixiviados en los diferentes puntos de muestreo del relleno sanitario "Bordo Poniente" en las tres primeras etapas durante el muestreo en época de estiaje (E-E) y en época de lluvias (E-LL).

Table 3. pH of the leachates in the different sampling sites in the first three phases of the "Bordo Poniente" landfill, during sampling in the dry (E-E) and rainy seasons (E-LL).

Etapas	I			II			III		
	PM	E-E	E-LL	PM	E-E	E-LL	PM	E-E	E-LL
1		7.88	8.51	7	7.85	9.91	13	7.78	7.10
2		7.11	s.d.	8	s.d.	9.07	14	8.18	7.52
3		8.20	8.01	9	s.d.	8.39	15	8.36	s.d.
4		6.84	s.d.	10	8.69	8.26	16	8.20	6.39
5		8.29	7.92	11	8.42	8.62	17	7.25	7.85
6		s.d.	s.d.	12	8.12	8.20	18	8.17	6.17

PM: Punto de muestreo

filtraron con papel wattman 41, libre de cenizas y se aforó a 50 mL con agua tridestilada y desionizada. Posteriormente, se analizaron las muestras en el espectrofotómetro de absorción atómica Analyst 100 de Perkin Elmer, en donde previamente, se elaboró la curva de calibración para cada metal. En todas las curvas se requirió una correlación superior a 98 %. Se hicieron tres determinaciones por cada muestra analizada.

Tabla 4. Valor de pH de los lixiviados en los diferentes puntos de muestreo del relleno sanitario "Bordo Poniente" en la etapa IV durante el muestreo en época de estiaje (E-E) y en época de lluvias (E-LL).

Table 4. pH of the leachates in the different sampling sites in phase IV of the "Bordo Poniente" landfill, during sampling in the dry (E-E) and rainy seasons (E-LL).

PM	E-E	E-LL	PM	E-E	E-LL
19	7.69	8.29	24	7.80	8.09
20	8.15	8.26	25	10.1	7.67
21	7.14	8.48	26	7.57	7.64
22	7.54	7.99	27	8.82	9.10
23	9.54	7.68	28	7.81	7.62

PM: Punto de muestreo

Para los metales Ag, Pb, Ni, Zn, Cr y Cd, las muestras ya digeridas, se inyectaron al espectrofotómetro de absorción atómica directamente, sin embargo, para el Hg, Se y As, fue necesario diluir 1mL de muestra en 10 mL de una solución de HCl al 1.5 % y para la medición del Hg, además, se agregaron tres gotas de solución de KMnO_4 al 5 %.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico de los resultados se realizó con el SPSS (Statistical Package for the Social Sciences, por sus siglas en inglés) versión 15. Los datos se sometieron a un ANOVA de uno y dos factores. En los parámetros en los que se presentaron diferencias estadísticas significativas, se aplicó la prueba de rango múltiple de Duncan (González-Flores *et al.* 2009). Para los datos obtenidos para el parámetro pH se decidió aplicar un Análisis de Varianza (ANOVA) de dos factores considerando como factores la época de muestreo, con dos niveles (E-E y E-LL), y el lugar en el cual se realizó la determinación del pH, es decir la etapa de operación, con cuatro niveles (EI, EII, EIII y EIV). De la misma manera se realizó un ANOVA de dos factores considerando época de muestreo y etapa para los valores de concentración de los siguientes elementos: Pb, Ni, Cr, Ag, Cd, Se, Ba y Hg. El ANOVA de un factor se aplicó para detectar las diferencias significativas entre los valores de pH de los lixiviados muestreados en los cárcamos, y también para determinar las diferencias estadísticas de la interacción obtenida en los análisis de varianza de dos factores.

RESULTADOS

pH de lixiviados

Del total de puntos muestreados en la época de estiaje (E-E) y durante la época de lluvias (E-LL) en las cuatro etapas del relleno sanitario Bordo Po-

Tabla 5. Concentración de algunos metales en los lixiviados de los rellenos sanitarios de las ciudades de Estambul (Turquía), Ciudad de México (Bordo Poniente) y Mérida (México).

Table 5. Concentration of some metals in landfill leachates of the cities of Istanbul (Turkey), Mexico (Bordo Poniente) and Mérida (Mexico).

Relleno sanitario	Metal en lixiviado (mg L ⁻¹)			
	Pb	Cd	Cr	Ni
Estambul, Turquía (Inanc et al. 2000)	0.87	0.09	0.35	0.73
Mérida, México (Méndez-Novelo et al. 2002)	0.38	0.01	6.98	s.d.
Bordo Poniente, México (el presente trabajo)	0.15	0.02	0.40	0.50

niente, el 90 % de los valores de pH se encontraron entre 6.17 y 8.82 (Tablas 3 y 4).

Para los valores de pH el ANOVA de dos factores (época de muestreo y etapa) indicó que no se presentaron diferencias estadísticas en relación a la época de muestreo, por lo que no hay diferencia significativa entre los valores de pH de los lixiviados muestreados en la E-E y aquellos muestreados en E-LL. Por otro lado, con respecto al factor etapa, sí se encontró diferencia significativa ($F_{(42,3)} = 4.5$, $p < 0.007$) y al aplicar la prueba de Duncan, se formaron dos grupos: en el grupo 1 se ubicaron las etapas I y III y en el grupo 2, las etapas II y IV; sin embargo, esta diferencia no tiene relación directa con la presencia o ausencia de geomembrana. Es conveniente indicar que también se presentaron diferencias estadísticas para la interacción de los factores época de muestreo x etapa, ($F_{(42,7)} = 3.2$, $p < 0.008$), al realizar la prueba de ANOVA de un factor para la interacción (Pardo, *et al.* 2007), con la prueba *a posteriori* de Duncan se formaron tres grupos, lo que indica que los valores de pH de los lixiviados obtenidos en estos grupos se ven afectados por la época en la que se realizó el muestreo y dependen de la presencia de lluvia o estiaje.

Valores de pH en escurrimientos

En cada etapa se tomaron muestras de dos escurrimientos, excepto en la etapa I para la que en el segundo muestreo sólo se encontró un escurrimiento. El pH de los lixiviados en escurrimientos presentó un valor mínimo de 6.39 (etapa III en E-LL), un máximo de 9.10 (etapa IV en E-LL) y un promedio de 7.99. El valor de pH más alto (9.10) correspondió a la muestra tomada de un encharcamiento sobre el

suelo natural formado por agua de lluvia y lixiviado, que se encontraba fuera de las macroceldas.

Valores de pH en pozos

La etapa I del relleno sanitario no cuenta con pozos de control, por lo que sólo se realizó muestreo de un pozo de control para las etapas II, III y IV. El pH en los pozos muestreados presentó un valor mínimo de 6.17 (etapa III en E-LL), un máximo de 8.20 (etapa II en E-LL). Por las características que presentan los pozos de control, se esperaría que los lixiviados colectados en estos puntos de muestreo no tuvieran interacción con el suelo del lugar, lo cual se ve confirmado en valores de pH ligeramente alcalinos.

Valores de pH en cárcamos

Los cárcamos representaron el mayor número de puntos muestreados, un total de 16 en las cuatro etapas. El pH de los lixiviados en los cárcamos presentó un valor mínimo de 7.10 (etapa III en E-LL), un máximo de 10.10 (etapa IV en E-E). En el muestreo llevado a cabo en la E-E se observó que, de los lixiviados de la etapa IV muestreados en cárcamos (puntos 19 a 25), la mayoría de los puntos presentaron intervalos de valores de pH entre 7.14 y 8.15, exceptuando los puntos 23 y 25 que presentaron valores de 9.54 y 10.10, respectivamente. Es importante señalar que en ninguno de los casos el valor de pH de los lixiviados de las cuatro etapas y durante los dos muestreos, se acercó a los valores límite establecidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005, que caracterizan a un residuo como Corrosivo ($pH \leq 2$ ó ≥ 12).

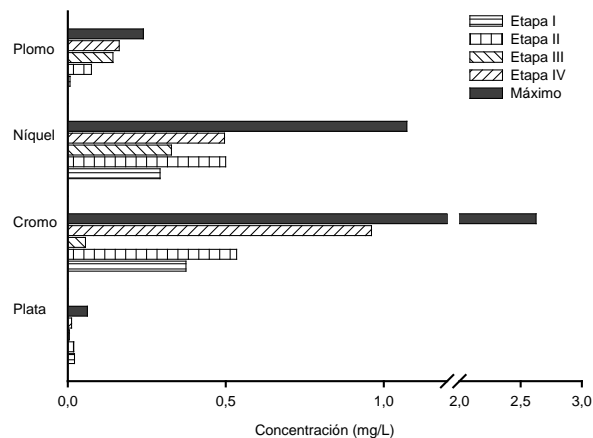


Figura 1. Concentraciones de metales en los lixiviados del muestreo en época de estiaje (E-E). El Límite Máximo Permisible (LMP) establecido en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005 para Cromo, Níquel, Plata y Plomo es de 5 mg L⁻¹. E1 representa etapa uno y así sucesivamente.

Figure 1. Metal concentrations in the leachates of the dry season. The maximum allowed limit established in the norm NOM-052-SEMARNAT-2005 for chromium, nickel, silver and lead is 5 mg L⁻¹. E1 represents phase I, and so on.

Metales Pesados

Las Figuras 1 y 2 presentan las concentraciones de Pb, Ni, Cr y Ag presentes en lixiviados durante los muestreos en E-E y E-LL de las cuatro etapas del relleno sanitario de Bordo Poniente. En ninguno de los casos y para ningún metal analizado se alcanzó el Límite Máximo Permisible (LMP). En estas figuras, las barras marcadas con la palabra máximo, indican la mayor concentración encontrada en algún punto determinado, para cada uno de los elementos analizados en este trabajo; por ejemplo, en la etapa IV para el muestreo en época de estiaje, el Cr alcanzó un poco más del 50% del valor establecido como LMP (Figura 1).

En el muestreo de la E-E (Figura 1), las máximas concentraciones de Pb se obtuvieron en las etapas III y IV, siendo el punto 18 (etapa III) el que registró el mayor valor (0.24 mg L⁻¹). Las mínimas concentraciones de este metal se obtuvieron en la etapa I (0.008 mg L⁻¹ en promedio) que es la más antigua y por lo tanto la más estable. En el muestreo en la E-LL (Figura 2), hubo un ligero aumento de la concentración de este metal en todas las etapas.

Para el Ni, las concentraciones más altas re-

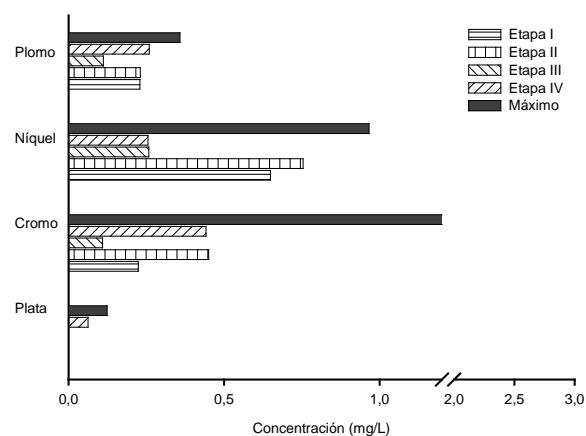


Figura 2. Concentraciones de metales en los lixiviados del muestreo en época de lluvias (E-LL). El Límite Máximo Permisible (MPL) para Cromo, Níquel, Plata y Plomo es de 5 mg L⁻¹.

Figure 2. Metal concentrations in the leachates of the rainy season. The maximum allowed limit for chromium, nickel, silver and lead is 5 mg L⁻¹.

gistradas se observaron en el punto de muestreo número 25 localizado en la etapa IV (1.04 mg L⁻¹) y en el punto número 11 localizado en la etapa II (1.07 mg L⁻¹); éste último tomado de un escurrimiento que se encontraba en el área de construcción de una carretera. Las demás muestras, se mantienen en el rango entre 0.18 y 0.69 mg L⁻¹.

En el caso del Cr, la concentración más alta se obtuvo en la etapa IV, en los puntos 25 y 26 (2.55 y 2.63 mg L⁻¹ respectivamente) y en las demás muestras se mantuvo por debajo de 1.8 mg L⁻¹. En el muestreo en E-LL disminuyó la concentración de Cr, en las etapas I, II y IV, mientras que en la etapa III se observó un ligero incremento de este metal.

En lo que respecta a las concentraciones de Ag, ninguna muestra de lixiviado superó el 0.01% del valor establecido como LMP por la norma NOM-052-SEMARNAT-2005. De igual manera, en ningún punto de muestreo las concentraciones de Cd (menores a 0.066 mg L⁻¹) presentes en los lixiviados alcanzaron ni la décima parte del LMP (1 mg L⁻¹) de acuerdo a lo presentado en la Figura 3.

Para el Ba y Se, tampoco se registraron concentraciones altas en los lixiviados, de hecho, la má-

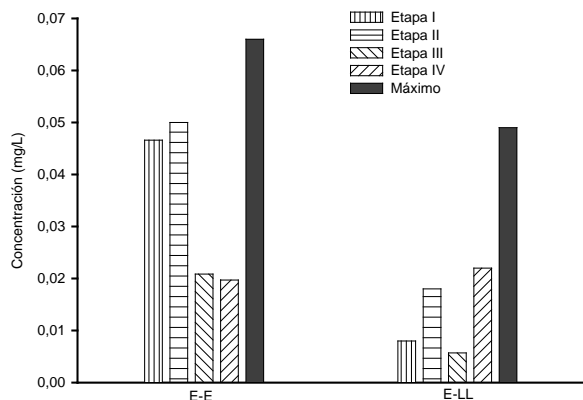


Figura 3. Concentraciones de Cadmio en los lixiviados en cada una de las diferentes etapas del relleno sanitario en los muestreos en época de estiaje (E-E) y época de lluvia (E-LL). El LMP para el Cadmio es de 1 mg L^{-1} .

Figure 3. Cadmium concentrations in the leachates of each of the different phases of the landfill sampled in the dry and rainy seasons. The maximum allowed limit for cadmium is 1 mg L^{-1} .

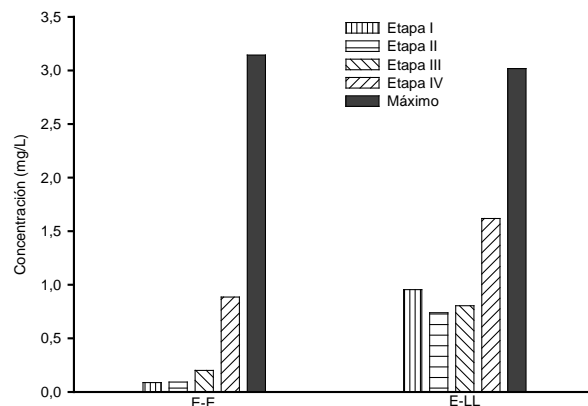


Figura 4. Concentraciones de Bario obtenidas en los lixiviados en cada una de las diferentes etapas del relleno sanitario durante los muestreos en época de estiaje (E-E) y época de lluvia (E-LL). Para el Bario el LMP es de 100 mg L^{-1} .

Figure 4. Barium concentrations in the leachates of each of the different phases of the landfill sampled in the dry and rainy seasons. The maximum allowed limit for barium is 100 mg L^{-1} .

xima concentración de Ba fue ligeramente superior a los 3 mg L^{-1} (Figura 4) y las concentraciones de Se fueron apenas menores a 0.002 mg L^{-1} (Figura 5). Comparando los resultados del primer y segundo muestreo, se observa un claro aumento en la concentración de Ba en la época de lluvias presentándose incluso una diferencia estadística significativa en el ANOVA de dos factores. Aunque los niveles de Ba en los lixiviados no alcanzaron el LMP, es importante hacer notar que en la temporada de lluvias las concentraciones de dicho metal se incrementaron a pesar de que se esperaba lo contrario por efecto de la dilución.

En lo que respecta al Hg, los resultados del muestreo en E-LL no variaron mucho con respecto al muestreo en E-E; las concentraciones encontradas en E-E fluctuaron entre 0.000366 y $0.000566 \text{ mg L}^{-1}$, con un valor máximo de $0.000818 \text{ mg L}^{-1}$ para un punto de la etapa IV, mientras que en E-LL los niveles se movieron en el rango de 0.000483 a $0.000538 \text{ mg L}^{-1}$, con un máximo de $0.000686 \text{ mg L}^{-1}$ en un punto de la etapa I (Figura 6).

Al igual que para el caso del pH, no se observó una relación directa entre las diferencias en la concentración de metales pesados en los lixiviados de las cuatro etapas del relleno sanitario y la ausencia

o presencia de la geomembrana. Sin embargo, en el ANOVA de dos factores se encontraron diferencias para el factor etapa en los metales Pb ($F_{(41,3)} = 6.4$, $p < 0.001$), Cd ($F_{(41,3)} = 8.8$, $p < 0.0001$), Cr ($F_{(41,3)} = 3.4$, $p < 0.027$), Ni ($F_{(41,3)} = 5.2$, $p < 0.004$) y Ba ($F_{(41,3)} = 6.3$, $p < 0.001$) y para el factor muestreo en el Pb ($F_{(41,1)} = 33$, $p < 0.0001$), Cd ($F_{(41,1)} = 45.7$, $p < 0.0001$) y Ba ($F_{(41,1)} = 14.3$, $p < 0.0001$); es decir, las concentraciones de metales (p. ej. Pb) en el muestreo llevado en época de estiaje (E-E) son diferentes si se comparan con las del muestreo en época de lluvias (E-LL).

En el análisis de dos factores para la concentración de metales, también se obtuvieron diferencias significativas para la interacción muestreo por etapa en algunos de los de los elementos químicos determinados, por lo que fue necesario realizar un ANOVA de un factor, así, para el Pb la prueba *a posteriori* de Duncan indicó la formación de 5 grupos; para el Cd se formaron tres grupos. El otro elemento químico que presentó interacción fue el Ni, para el que se formaron dos grupos. Lo anterior indica, que las concentraciones de estos tres elementos químicos fueron afectados por los factores época de muestreo y etapa de operación.

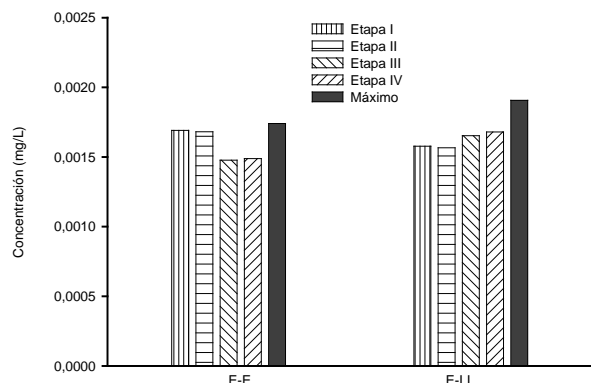


Figura 5. Concentraciones de Selenio en los lixiviados en cada una de las diferentes etapas del relleno sanitario en los muestreos en época de estiaje (E-E) y época de lluvia (E-LL). Para el Selenio el LMP es de 1 mg L^{-1} .

Figure 5. Selenium concentrations in the leachates of each of the different phases of the landfill sampled in the dry and rainy seasons. The maximum allowed limit for selenium is 1 mg L^{-1} .

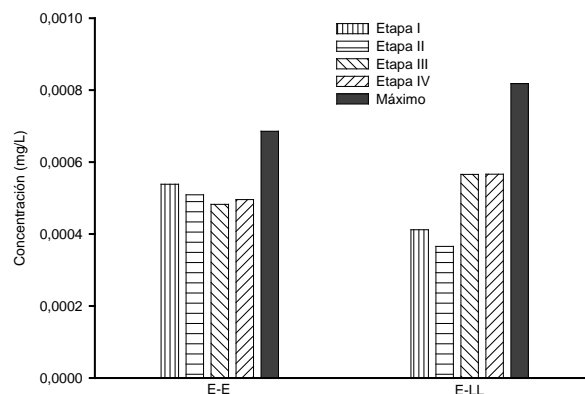


Figura 6. Concentraciones de Mercurio en los lixiviados en cada una de las diferentes etapas del relleno sanitario en los muestreos en época de estiaje (E-E) y época de lluvia (E-LL). Para el Mercurio el LMP es de 0.2 mg L^{-1} .

Figure 6. Mercury concentrations in the leachates of each of the different phases of the landfill sampled in the dry and rainy seasons. The maximum allowed limit for mercury is 0.2 mg L^{-1} .

DISCUSIÓN

Se ha establecido que entre más joven es un relleno sanitario, existe mayor probabilidad de tener lixiviados ácidos y de acuerdo a algunos autores, la evolución del pH en un relleno sanitario se mueve desde valores ácidos (pH 3.7) en la fase de operación, hasta valores alcalinos (pH 8.5) algunos años después de haber sido clausurado (Pillay 1985; Diamadopoulos 1994; Ozturk *et al.* 1999; Inanc *et al.* 2000). Para este estudio, se consideró que las características de los lixiviados muestreados en los cárcamos, podrían tomarse como un buen indicador de la evolución o estado en que se encuentra cada etapa del relleno sanitario, debido a que en dichos puntos de muestreo los lixiviados están todavía al interior del sistema que fue construido para su captación. En este estudio los valores de pH mostraron diferencias significativas dependientes de la antigüedad de las etapas; sin embargo, no se observó un amplio rango de variación en este parámetro como se ha observado en otros rellenos sanitarios; por ejemplo, para el caso particular de la etapa IV del relleno sanitario, no se observaron valores de pH ácidos en los lixiviados, a pesar de estarse desarrollando de manera intensa la fase de acidogénesis por encontrarse en

operación cuando se realizó el muestreo.

Es de interés resaltar que los valores más altos de pH en los lixiviados de Bordo Poniente, se encontraron en cárcamos dañados o abiertos y en un escurrimiento sobre suelo natural fuera de las macroceldas; por ejemplo, en el muestreo en E-E se encontraron valores altos de pH en los puntos 23 (pH 9.54) y 25 (pH 10.10), debido a que en el punto 25 el cárcamo se encontraba dañado y el cárcamo del cual se tomó la muestra en el punto 23 no tenía tapa, por lo que ambos cárcamos se encontraban abiertos todo el tiempo y expuestos al polvo alcalino del lugar. En el mismo sentido, cabe destacar que durante el muestreo en E-LL en la etapa II, se observaron valores de pH de 9.91 y 9.07 en los puntos 7 y 8, donde se encontraron dañados los cárcamos debido a la construcción de una carretera que actualmente atraviesa este sitio. En este último caso el material de construcción y el polvo proveniente de los suelos del lugar, definitivamente pudieron haber alterado el pH de los lixiviados que en ocasiones inclusive se encontraron fuera del cárcamo. Estos hallazgos nos hacen sugerir que en dichos casos, el incremento del pH en los lixiviados, se debió a que entraron en contacto o fueron "contaminados" en mayor o menor grado con el suelo salino del lugar.

Si del total de las muestras tomadas en cárcamos, se analizan separadamente aquellas extraídas de cárcamos dañados, donde se alteró el pH por contacto de materiales externos al relleno sanitario, y aquellas de cárcamos en buenas condiciones, se puede apreciar que: - Los valores de pH de los lixiviados extraídos de los cuatro cárcamos dañados se encontraron entre 9.07 (etapa II, segundo muestreo) y 10.10 (etapa IV, primer muestreo), con un promedio de 9.65. Este valor promedio es próximo al pH de 9.10 del lixiviado muestreado de un encharcamiento ubicado sobre el suelo natural (fuera del área del relleno sanitario), lo cual hace suponer la influencia del contacto con el suelo sobre el nivel de basicidad del lixiviado. - Los 24 datos de pH de los lixiviados provenientes de los cárcamos en buenas condiciones, donde el lixiviado no entró en contacto con suelo nativo o el material externo, se encuentran entre 7.10 (etapa III en E-LL) y 8.51 (etapa I en E-LL), con un promedio de 7.9 para las etapas I, II y III (sin geomembrana) y un promedio de 7.89 para la etapa IV con geomembrana.

El análisis estadístico de los datos obtenidos muestra que hay una diferencia significativa entre el pH de los lixiviados donde los cárcamos fueron dañados, con respecto a los provenientes de los cárcamos íntegros ($F_{(48,1)} = 40.27$, $p < 0.0001$), lo cual podría ser consecuencia del contacto de los lixiviados con polvo del terreno adyacente que, como ya se comentó, es muy alcalino. Por otro lado, no se encontró diferencia significativa atribuible a la presencia o ausencia de geomembrana. Estos resultados, en conjunto, sugieren que el efecto de la "contaminación" por suelo nativo (salino-sódico) y materiales contaminantes en el pH de los lixiviados es más importante que el de la migración de sales del suelo natural hacia el interior de las celdas mediante capilaridad.

En relación a las concentraciones de metales, los lixiviados del relleno sanitario de Bordo Poniente no presentaron niveles altos en todos los elementos analizados. En todos los casos se encontraron por debajo del LMP que establece el listado de la NOM-052-SEMARNAT-2005, aun cuando las concentraciones de algunos elementos como el Pb, Ba, Hg y Se se incrementaron en el muestreo llevado

a cabo en la época de lluvias. En el caso de estos metales, la presencia de mayores niveles en los lixiviados obtenidos del muestreo en época de lluvias podría deberse a una mayor lixiviación del metal, en parte porque el pH de la lluvia fue ligeramente ácido presentando valores entre 5.5 y 6.5, de acuerdo a lo reportado por el Sistema Meteorológico Nacional (INE 2006), lo cual aumenta la solubilidad y por lo tanto la lixiviación de los metales contenidos en los RSU. Este efecto no se observó con los demás metales porque, si bien puede haber una mayor lixiviación, también hay una dilución de éstos por el incremento de lixiviados durante la época de lluvias (E-E). Para los otros metales evaluados, las concentraciones encontradas en la época de lluvias fueron ligeramente menores a las de la época de estiaje.

En virtud del potencial contaminante de los metales y elementos evaluados en este trabajo, es importante hacer notar que las concentraciones encontradas fueron bajas. El Hg es un metal altamente contaminante, principalmente cuando se encuentra en su forma metilada y que puede ser encontrado en sitios de disposición final de RSU. En ambos muestreos (estiaje y lluvias) la concentración medida fue inferior al 20 % del LMP (Figura 6).

En lo que respecta al Cd, en el año 2001 Jiménez-Cisneros reportó que los lixiviados de la etapa IV tenían una concentración de 0.040 mg L^{-1} , que concuerda con los datos obtenidos en el presente trabajo, donde se encontraron concentraciones máximas de 0.066 mg L^{-1} ; sin embargo no se tiene el dato de la época del año en que se llevaron a cabo los análisis presentados por Jiménez-Cisneros y, como ya se explicó, la temporada de lluvias puede afectar la composición de los lixiviados. El Cd se encuentra en objetos como pilas de níquel-cadmio, aleaciones de soldadura, bulbos de televisión, celdas fotoeléctricas, etc. (Rousseaux *et al.* 1989). Estos residuos no llegan en grandes cantidades al relleno sanitario, por lo que era poco probable que se encontraran concentraciones altas de Cd. De manera similar, no se esperaba encontrar concentraciones altas de Ba en los lixiviados de Bordo Poniente ya que los residuos que contienen este metal son aleaciones, desoxidante de cobre, lubricante para rotores, ánodos en tubería de rayos X, aleaciones de bujías,

entre otros; y dichos residuos no son muy comunes en un relleno sanitario. En efecto, la máxima concentración de Ba encontrada en los lixiviados sólo representó el 3 % del LMP (100 mg L^{-1}) establecido por la NOM-052-SEMARNAT-2005.

En relación al Se, los niveles encontrados en los lixiviados analizados en este trabajo representan el 0.2 % del LMP establecido por la norma mexicana, por lo cual no constituyen un peligro para la salud del ser humano, animales o al medio ambiente (Figura 5), pues este mineral en pequeñas cantidades es incluso un nutriente esencial para algunos animales. Este elemento se incluyó en este estudio porque, aunque no es un metal pesado, sí se señala en la NOM-052-SEMARNAT-2005 como un elemento que debe mantenerse controlado bajo norma.

Resulta interesante comparar los resultados obtenidos en el presente trabajo con los resultados reportados en el año 2000 por Inanc *et al.* donde se analizan los lixiviados del relleno sanitario de Estambul, pues por tratarse de las capitales de dos países en vías de desarrollo, la Ciudad de México y Estambul son dos grandes metrópolis que poseen rellenos sanitarios de grandes proporciones. El relleno sanitario de la ciudad Turca recibe más de $8\,000 \text{ t d}^{-1}$, mientras que el relleno sanitario Bordo Poniente de México recibe $13\,400 \text{ t d}^{-1}$. La concentración de cuatro metales en los lixiviados de ambos rellenos es muy parecida (Tabla 5). Lo anterior nos muestra que en la actualidad los hábitos de consumo y por lo tanto los materiales desechados en las grandes ciudades son muy semejantes, reflejándose esto en prácticamente las mismas concentraciones de algunos metales en los lixiviados de los sitios de disposición final. Otra comparación interesante es aquella entre lo encontrado en este estudio y lo observado por Méndez-Novelo *et al.* (2002) en el relleno sanitario de la ciudad de Mérida (Yucatán) (Tabla 5), donde se realizaron análisis de metales pesados; lamentablemente sólo se coincide en tres elementos con los análisis realizados en el presente trabajo. En dicho estudio, para el caso del Pb y Cd, las concentraciones encontradas son muy similares a las del presente trabajo y de igual manera se encuentran muy por debajo del LMP de la NOM-052-

SEMARNAT-2005; sin embargo, en lo que respecta al Cr, las concentraciones están por arriba del LMP de la norma antes mencionada. Tanto el relleno sanitario de Mérida como el de Bordo Poniente, se encuentran ubicados sobre suelos alcalinos; la particularidad del relleno sanitario de Mérida, es que se utiliza ese mismo suelo alcalino como material de cobertura. Sin embargo, esta situación no es exclusiva del sitio analizado, pues también ha sido observada en otros rellenos sanitarios de nuestro país.

Del presente estudio se puede concluir que, a diferencia de lo reportado en rellenos sanitarios de otros países, el pH de los lixiviados en el relleno sanitario de Bordo Poniente de la Ciudad de México se situó entre valores neutros y alcalinos, y aún cuando se encontró una diferencia significativa en los valores de pH de los lixiviados en las diferentes etapas, dicha diferencia no tiene relación aparente con la ausencia o presencia de la geomembrana, pero sí con la integridad de los cárcamos de recolección, pues los valores más altos de pH en los lixiviados se encontraron en cárcamos dañados o abiertos y en un escurrimiento sobre suelo natural fuera de las macroceldas. Por otro lado, aunque los lixiviados estén considerados como residuos peligrosos de acuerdo a la NOM-052-SEMARNAT-2005, al momento del muestreo los lixiviados del relleno sanitario de Bordo Poniente no representaron un riesgo ambiental, debido a que el pH que se encontró en la mayoría de los casos alrededor de 8 y las concentraciones encontradas de metales como el Pb, Ni, Cr, Ag, Cd, Se, Ba y Hg no rebasaron los LMP establecidos en la norma NOM-052-SEMARNAT-2005. Por otro lado, las concentraciones de metales en los lixiviados no varían considerablemente de un punto a otro y tampoco de una etapa a otra, lo cual nos indica que aunque la superficie muestreada es de grandes dimensiones, presenta homogeneidad en su composición.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realizó gracias al apoyo logístico de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y al apoyo financiero otorgado de la Secretaría de In-

investigación y Posgrado del IPN a este proyecto. Los autores agradecen también a la Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del IPN

por el apoyo brindado para la difusión de los resultados de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- APHA, AWWA, WEF (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water, 20th Edition, Washington. USA.
- Baun DL, Christensen TH (2004) Speciation of heavy metals in landfill leachate: a review. *Waste Management and Research* 22 (1): 3-23.
- Cruickshank-García G (1998) Proyecto Lago de Texcoco, Rescate Hidroecológico. CNA y DGSU, México. Segunda Edición. 138 pp.
- Diamadopoulou E (1994) Characterization and treatment of recirculation-stabilized leachate. *Water Research* 28 (12): 2439-2445.
- González-Flores E, Tornero-Campante MA, Ángeles-Cruz Y, Bonilla y Fernández N (2009) Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25 (1) 15-22.
- Inanc B, Calli B, Saatci A (2000) Characterization and anaerobic treatment of the sanitary landfill leachate in Istanbul. *Water Science and Technology* 41 (3): 223-230.
- INE (2006) http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/16/parte4_17.html
- JICA (1999) Estudio sobre el Manejo de Residuos Sólidos Para La Ciudad de México de Los Estados Unidos Mexicanos, Agencia de Cooperación Internacional del Japón, México, Marzo 1999, pp. B-44 a B-53.
- Jiménez-Cisneros BE (2001) La contaminación Ambiental en México, Ed., Limusa Noriega editores, México, pp. 409-505.
- Méndez-Novelo RI, Cachón-Sandoval E, Sauri-Riancho MR, René-Castillo-Borges ER (2002) Influencia del material de cubierta en la composición de los lixiviados de un relleno sanitario. *Revista Ingeniería* 6 (2): 7-12.
- Murillo-Torres RM, Barrios-Pérez JA, Jiménez Cisneros B (2002) Aplicación de biosólidos como mejoradores de suelos salino-sódicos. XIII congreso nacional FEMISCA.
- NMX-AA-003-1980 (Aguas residuales-muestreo) Dirección General de Normas, Normas oficiales mexicanas y normas mexicanas. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 25 de marzo de 1980.
- NOM-052-SEMARNAT-2005. Dirección General de Normas, Normas oficiales mexicanas y normas mexicanas. Características, procedimiento de identificación, clasificación y listados de los residuos peligrosos. Norma publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006.
- NOM-083-SEMARNAT-2003. Dirección General de Normas, Normas oficiales mexicanas y normas mexicanas. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
- Ozturk I, Altinbas M, Arikan O (1999) Pollution problems of sanitary landfill leachate and treatment techniques, *Proceedings of City Management, Human and Environmental Problems Symposium 99*, 17-19 february, Estambul, Turkey.

- Pardo A, Garrido J, Ruíz M, San Martín R (2007) La interacción entre factores en el análisis de varianza: errores de interpretación. *Psicotema* 19 (2): 343-349.
- Pillay G (1985) Étude des propriétés d'absorption des mâchefères d'incinération d'ordures ménagères; application à l'épuration des lixiviats de décharge. Thèse doctorale, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Robles-Martínez F (2008) Generación de biogás y lixiviados en los rellenos sanitarios. Segunda Edición, Dirección de Publicaciones del Instituto Politécnico Nacional, México D.F. 115 pp.
- Rousseaux P, Navarro A, Vermande P (1989) Heavy metal distribution in household waste, *Biocycle*. September, 81-84.
- SMA (2009) Inventario de residuos sólidos del Distrito Federal 2008. Secretaría del Medio Ambiente del D.F. México, D.F. 49 pp.