

# Tratamiento de lixiviados con carbón activado

Roger Iván Méndez Novelo<sup>1</sup>, Emilio Medina Hernández<sup>2</sup>, Carlos Quintal Franco<sup>3</sup>, Elba René CastilloBorges<sup>1</sup>,  
María Rosa Sauri Riancho<sup>3</sup>

## RESUMEN

El relleno sanitario de la ciudad de Mérida, utiliza un material de cubierta denominado localmente sahcab que posee elevadas concentraciones de carbonato de calcio que al contacto con el agua de lluvia incrementa la dureza del líquido y el aporte de calcio a los lixiviados. Por otra parte, al aplanar el sahcab durante la operación del relleno, se reduce su porosidad y actúa como filtro dentro del relleno, por lo que el contenido de sólidos suspendidos del lixiviado es bajo. Este resultado se comprobó mediante un análisis de los tamaños de las partículas suspendidas que resultaron en promedio de 23  $\mu$ m. Partículas coloidales de pequeño tamaño producen color a las suspensiones y son difíciles de remover por tratamientos fisicoquímicos (coagulación – floculación – sedimentación) y las mejores remociones se obtienen a valores de pH bajos.

El objetivo de este trabajo es determinar la tratabilidad fisicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario de la Ciudad de Mérida, mediante el uso de columnas empacadas con carbón activado, a través de las cuales se hizo pasar lixiviado crudo y lixiviado con pH ácido, cercano a 2.

Los mejores resultados fueron obtenidos en los ensayos en los que se utilizó lixiviados con pH ácido. Para el mismo tiempo de contacto, de 8 horas, se alcanzaron remociones de 65% de DQO para lixiviados sin tratamiento, mientras que en los ensayos con reducción de pH, se obtuvieron remociones de 90%.

**Palabras Clave:** Lixiviado, carbón activado, relleno sanitario, adsorción

---

## INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos sólidos urbanos ha evolucionado desde vertederos a cielo abierto, hasta rellenos sanitarios altamente tecnificados donde se controlan las emisiones líquidas y gaseosas potencialmente peligrosas para el medio ambiente. Tanto en los vertederos a cielo abierto como en los primeros rellenos sanitarios no se controlaban las emisiones líquidas (llamadas lixiviados) y éstos escurrían a fuentes superficiales de agua o bien se infiltraban a las capas inferiores del terreno y en muchos casos contaminaban los acuíferos subyacentes a ellos. Existen en la bibliografía numerosos reportes de impactos a acuíferos ocasionados por rellenos sanitarios.

La generación de lixiviados en los rellenos sanitarios depende de muchos factores, entre los que se encuentran el grado de compactación de los desechos, el grado de humedad inicial de la basura, el tipo de material de cubierta de las celdas, la precipitación

---

<sup>1</sup> Profesor de Carrera del Cuerpo Académico de Ingeniería Ambiental, FIUADY. (mnovelo@tunku.uady.mx)

<sup>2</sup> Tesista de la Maestría en Ingeniería Ambiental, FIUADY.

<sup>3</sup> Profesor Investigador del Cuerpo Académico de Ingeniería Ambiental, FIUADY.

pluvial, humedad atmosférica, temperatura, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y la capacidad de campo del relleno. La composición de los lixiviados depende del tipo de desecho confinado, del nivel de degradación de los residuos y del volumen producido. En el proceso que se desarrolla en el relleno sanitario, no pueden separarse los líquidos provenientes de procesos de reacción bioquímica de los de lixiviación. Todo cambio en la estructura y composición del relleno tiene efecto sobre las corrientes y la acumulación, de tal modo que el agua y los procesos en el relleno son magnitudes que se influyen recíprocamente.

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes en los que se han ensayado diferentes tratamientos, tanto biológicos (aerobios o anaerobios) como fisicoquímicos (Coulter *et. al.* 1997). Entre estos últimos, la adsorción con carbón activado ha mostrado ventajas comparativas con respecto de otros sistemas de tratamiento fisicoquímico.

El proceso de adsorción puede describirse como la transferencia de un soluto en un gas o líquido (adsorbato) hacia la superficie de un sólido (adsorbente) en donde el soluto es retenido como resultado de atracciones intermoleculares con las moléculas sólidas. Como regla general, los solutos más fáciles para adherirse son los compuestos más complejos, molecularmente hablando, y el sólido más usado es el carbón activado (Noll, 1992; Cheremisinoff, 1978; La Grega, 1994). En el proceso de adsorción, se tiende a alcanzar un equilibrio entre la concentración del sustrato y la cantidad de sustancia retenida. Por lo general la cantidad de materia adsorbida se determina como una función de la concentración del adsorbato (C) a temperatura constante (T), llamándose a la función resultante isoterma de adsorción. Las isotermas más utilizadas son las de Freundlich, Langmuir y la de Brunauer, Emmett y Teller (BET).

La concentración de contaminantes de los lixiviados varía con el tiempo, por lo que difícilmente puede emplearse con éxito un único tratamiento a estos líquidos. Lixiviados de rellenos jóvenes, poseen elevadas concentraciones de materia orgánica e índices de biodegradabilidad ( $DBO_5/DQO$ ) superiores a 0.4, lo que hace posible que sean tratados eficientemente por procesos biológicos; pero en lixiviados de rellenos viejos, con índices de biodegradabilidad inferiores a 0.02, estos tratamientos no son eficientes (Waritch *et. al.* 1998).

En la ciudad de Mérida y en general en la Península de Yucatán la única fuente de

abastecimiento es el acuífero, el cual se caracteriza por una gran permeabilidad, lo que se asocia a su elevada vulnerabilidad. Por este motivo, para proteger al acuífero, es de suma importancia coleccionar, tratar y disponer adecuadamente los lixiviados generados en el relleno sanitario de la Ciudad de Mérida. Este relleno sanitario comenzó a operar en noviembre de 1997 y recibe casi la totalidad de los residuos sólidos municipales no peligrosos de la ciudad. Opera con el método de área, por lo que el volumen de residuos crece en forma piramidal, con pendientes de talud exterior con una relación horizontal-vertical de 3:1. La altura máxima final del proyecto, será de 30 m. El sistema de impermeabilización de las celdas y de las lagunas de evaporación de lixiviados representa un aspecto fundamental del proyecto. El sistema de impermeabilización está conformado por una doble capa de geomembranas de polietileno de alta densidad (HDPE); la superior funciona directamente en contacto con los lixiviados cuando éstos circulan a través de la capa de filtro y sobre la capa de HDPE hacia el cárcamo; la inferior funciona como una segunda garantía a fin de contar con un mayor factor de seguridad contra la contaminación del subsuelo y el acuífero subterráneo. Las dos capas de HDPE se combinan con el mismo número de capas de geotextil a fin de proteger a las primeras contra posibles daños. Los lixiviados se coleccionan en el cárcamo de cada una de las celdas y son bombeados periódicamente hacia las lagunas de evaporación desde donde se recirculan sobre la superficie del relleno, principalmente en época de secas.

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio sobre la tratabilidad fisicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, mediante el uso de carbón activado. Este relleno sanitario utiliza un material de cubierta denominado sahcab que posee elevadas concentraciones de carbonato de calcio que al contacto con el agua de lluvia presenta la reacción  $CO_2 + Ca = CaCO_3$ , lo que incrementa la dureza del líquido y el aporte de calcio a los lixiviados. Por otra parte, al aplanar el sahcab, reduce su porosidad y actúa como filtro dentro del relleno, por lo que se espera que el contenido de sólidos suspendidos sea bajo.

El valor del pH inicial en el proceso de carbón activado se relaciona con la eficiencia de remoción de contaminantes. Jialong *et. al.*, 2000 demostraron que la tasa de adsorción de contaminantes orgánicos en soluciones acuosas se incrementa cuando decrece el pH debido a que se reduce la carga negativa de la superficie de la biomasa. En este trabajo se planteó la posibilidad de

obtener mejor eficiencia de remoción de contaminantes (medida como DQO) de los lixiviados del relleno sanitario sometidos al proceso de adsorción, si previamente se reduce el pH para flocular los coloides orgánicos del lixiviado.

## METODOLOGÍA

### Caracterización de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Mérida

Para poder obtener las características físicas y químicas de los lixiviados, se obtuvieron 10 muestras de éste durante un mes. El lixiviado se colectó en las lagunas de evaporación que se encuentran a un costado del relleno sanitario. A cada una de las muestras se le determinó los siguientes parámetros: pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, COT, N-NH<sub>3</sub>, NKT, N-Org, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, P total, Turbiedad, Dureza total, Alcalinidad, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Fe, Ca, Mg, Mn, Zn, Na, K, Cd, Pb, Cr y Cu. Todos los análisis fueron realizados de acuerdo con los Métodos Estándar para las Aguas y Aguas Residuales (APHA-AWWA-WPCF, 1998).

### Determinación del tamaño de las partículas

Se determinó el tamaño de partícula de los lixiviados con un equipo Coulter modelo LS100Q, el cual utiliza el método de dispersión de luz con un rango de detección 0.4 a 900 µm. Para este efecto se tomaron 9 muestras de lixiviado y se corrieron las pruebas, se promediaron y graficaron los resultados.

### Determinación de las isoterms de adsorción

Para determinar las isoterms de adsorción del proceso, se realizaron, por triplicado, ensayos con carbón activado granular de la marca comercial MERCK con un tamaño aproximado de grano de 1.24 mm, residuos de calcinación ≤ 5% y densidad real de 1.53 g/cm<sup>3</sup>. Para este efecto se agitaron durante una hora diferentes cantidades de carbón activado (0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 y 2.50 g) en 50 ml de lixiviado, se filtró la mezcla con papel Wathman No. 40 y se le determinó al filtrado la DQO. Se calculó en cada caso la remoción de DQO tomándose como concentración inicial la del lixiviado crudo. Con los resultados obtenidos y de acuerdo con cada modelo, se graficaron las isoterms de Freundlich, Langmuir y de Brunauer, Emmett y Teller (BET). Para poder definir cuál de los modelos teóricos se ajustaba mejor a las condiciones experimentales, se realizó una prueba de bondad de ajuste ( $\chi^2$ ).

### Evaluación del proceso de adsorción

Para evaluar el proceso de adsorción se construyeron dos columnas de acrílico con las características mostradas en la Tabla 1. Las columnas se operaron en paralelo y con flujo ascendente empleando una bomba de diafragma. Se probaron gastos de 3 y 6 ml/min a los que les corresponden tiempos de contacto de 8 y 4 horas respectivamente. En cada ensayo se determinó la DQO, en el influente y en el efluente, cada hora durante las primeras 5 horas y después se amplió el rango de tiempo de acuerdo con la evolución de la concentración del efluente.

Tabla 1: Características de las columnas de adsorción

PARÁMETRO	VALOR
Diámetro de la columna (cm)	5.70
Altura total de la columna (cm)	58.80
Altura de la columna de carbón activado (cm)	49.50
Cantidad de carbón activado (g)	640
Porosidad	0.216

osteriormente, para probar la hipótesis de que a pH bajo se obtienen mejores eficiencias de remoción de materia orgánica, se evaluaron simultáneamente las columnas, una con el lixiviado crudo y otra con lixiviado al que previamente se le ajustó el pH a 2, ambas con tiempos de contacto de 8 horas.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos de la caracterización del lixiviado se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Caracterización de los Lixiviados

PARÁMETRO (UNIDAD)	MEDIA	RANGO	PARÁMETRO (UNIDAD)	MEDIA	RANGO
pH	8.40	8.34 – 8.50	Sulfuros (mg/l)	405	30 – 705
Turbiedad (UNT)	108	95 – 130	O <sub>2</sub> (mg/l)	0.91	0.15 – 1.30
Alcalinidad (mg/l) como CaCO <sub>3</sub>	6857	5340 – 11107	SST (mg/l)	73	42 – 88
Dureza Total (mg/l) como CaCO <sub>3</sub>	964	720 – 1196	SSV (mg/l)	51	38 – 64
Cloruros (mg/l)	2804	2489 – 3332	ST (mg/l)	12810	10064– 16214
Redox	67	30 - 123	STV (mg/l)	3839	2546 – 5260
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	1652	920 – 2580	Cu (mg/l)	0.320	0.290 – 0.388
DQO Total (mg/l)	5764	4460 – 7610	Fe (mg/l)	102.9	76.7 – 164.4
DQO Soluble (mg/l)	5532	4410 – 7490	Mn (mg/l)	1.28	1.08 – 1.49
COT (mg/l)	2857	2283 – 4380	Zn (mg/l)	5.02	3.60 – 5.80
Grasas y ac. (mg/l)	27	4 – 62	Na (mg/l)	20145	15540– 28180
SAAM (mg/l)	6.74	0.88 – 13.80	K (mg/l)	16139	3711 – 23100
N-NH <sub>3</sub> (mg/l)	1481	1120 – 2303	Cd (mg/l)	0.0107	0.086 – 0.158
N-org (mg/l)	176	82 – 298	Pb (mg/l)	0.384	0.265 – 0.900
NKT (mg/l)	1659	1232 – 2515	Cr (mg/l)	6.98	4.74 – 14.35
P Total (mg/l)	24.74	7.04 – 45.54			

En la tabla 2 se observa, por los resultados obtenidos de la caracterización, que las concentraciones de los parámetros monitoreados no son las que realmente deberían tener los lixiviados generados por rellenos con una antigüedad de 5 años, esto podría deberse a que el lixiviado en las lagunas se encuentra sometido a la dilución producida por las precipitaciones pluviales, a una continua evaporación de acuerdo con las condiciones climáticas imperantes y a un proceso de recirculación sobre las celdas por lo que el lixiviado que se colecta en los cárcamos de las diferentes celdas son enviados a las lagunas, por lo tanto existe una mezcla de lixiviados jóvenes y viejos. Aunado a lo anterior, el material de cubierta utilizado en el relleno sanitario de la ciudad de Mérida, como se mencionó anteriormente, es un material con alto contenido de carbonato de calcio que al contacto con el agua de lluvia aumenta la dureza del líquido y el aporte de calcio a los lixiviados. Todo esto podría estar causando que se lleven a cabo distintas reacciones químicas, produciendo quizá compuestos mucho más contaminantes o permitiendo la degradación de éstos. En la misma Tabla 2 se observa, que la mayor parte de la materia orgánica se encuentra en forma soluble. Así, se tiene que mientras la concentración de los sólidos totales es en promedio 12,810 mg/l, la concentración de los sólidos totales disueltos es de 12,737 mg/l, es decir el 99% de los

sólidos está en forma soluble. A la misma conclusión se puede llegar, analizando la DQO total y la DQO soluble en la que con un análisis semejante se llega a la conclusión de que el 95.98% de la DQO total está en forma soluble. Este hecho se podría deber a que el material de cubierta al irse compactando funciona como un filtro, impidiendo el paso del material suspendido. El pH de los lixiviados tiene valores superiores a los reportados para lixiviados en la fase metanogénica (lixiviados viejos), lo que se explica por la reacción con el material de cubierta. Se observan elevados niveles de sodio y potasio que se podrían relacionar con la disolución del material de cubierta usado. Se tiene la presencia de metales pesados, Cd, Pb, Cr, Cu, los cuales son tóxicos. La presencia de estos metales en el lixiviado podría relacionarse con las condiciones de operación del relleno, así como con el manejo de lixiviados; situación que da lugar a que se presenten en el relleno procesos de desorción más que de adsorción.

Para determinar si la materia orgánica se encontraba realmente disuelta o en forma coloidal, se determinó el tamaño de partículas en el lixiviado. El rango de diámetros de éstas fue de 0.375 a 948.2 µm, con un promedio de 22.97 µm, esto indica que la mayoría de las partículas presentes en el lixiviado crudo son del tipo coloidal. Las partículas coloidales

mas pequeñas, que se encuentran en el umbral de los sólidos disueltos son generalmente las que dan el color al lixiviado, y para su remoción es conveniente

bajar el pH de la muestra. En la Figura 1, se presenta la distribución promedio del tamaño de partículas en el lixiviado.

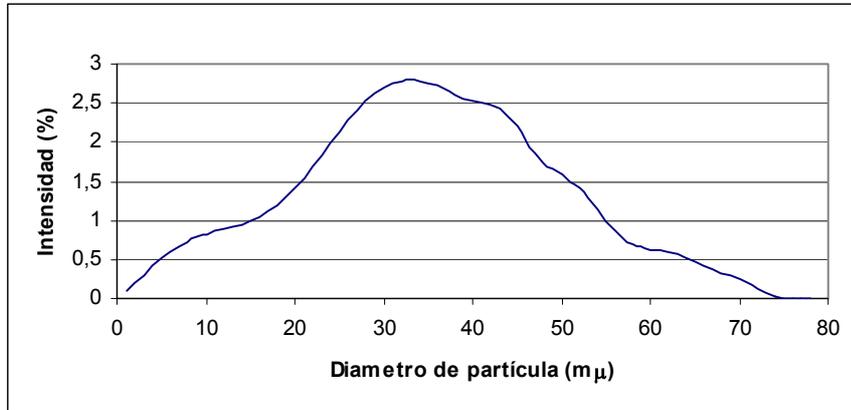


Figura 1. Dispersión de los tamaños de partículas de los lixiviados

De manera general puede decirse que los valores de los parámetros del lixiviado estudiado se encuentran entre los reportados para las fases acidogénica y metanogénica, es decir que se refleja que están mezclados lixiviados jóvenes con lixiviados antiguos. Así, la DQO, la DBO<sub>5</sub> y los metales, tienen valores intermedios entre los reportados como típicos para las fases acidogénica y metanogénica. La coexistencia de valores elevados de pH con metales disueltos (que se solubilizan a valores de pH bajos), se justifica porque en algunos sitios del relleno, se tienen condiciones acidogénicas, es decir que los lixiviados son ácidos y solubilizan los metales, luego al pasar por la capa de sahcah y reaccionar con él, el pH se eleva pero no lo suficiente para precipitar los metales disueltos.

Las isotermas de adsorción, en general, representan la relación que existe entre la cantidad de soluto adsorbido y la cantidad de adsorbente utilizado. En la Tabla 3, se presentan los resultados promedio obtenidos de la relación X/M (g de material removido/g de carbón activado) para el lixiviado y carbón activado empleados. Con base en estos resultados, se ajustaron los tres modelos de isotermas y se compararon con un análisis de varianza de una vía cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.

Freundlich

$$\frac{X}{M} = 1.9 \times 10^{-3} C^{1/2.39}$$

Langmuir

$$\frac{X}{M} = \frac{3.25 \times 10^{-5} C}{1 + 1.11 \times 10^{-1} C}$$

BET

$$\frac{x}{m} = \frac{4.72 \times 10^{-3} C}{(6089 - C)[1 - 2.96 \times 10^{-4} C]}$$

**Tabla 3: Resultados de X/M**

Carbón (mg) (M)	DQO efluente (mg/l) (C)	DQO adsorbida (mg) (X)	X/M (mg/mg)	C <sub>0</sub> - C
258.3	5662.22	21.34	8.26E-02	426.81
518.1	5473.44	30.78	5.94E-02	615.59
760.8	5112.30	48.84	6.42E-02	976.73
1010.2	4677.28	70.59	6.99E-02	1411.75
1259.0	4513.13	78.80	6.26E-02	1575.90
1515.8	3708.76	119.01	7.85E-02	2380.27
1760.3	3684.14	120.24	6.83E-02	2404.90
2018.8	3856.50	111.63	5.53E-02	2232.53
2262.7	3913.96	108.75	4.81E-02	2175.08
2513.1	3659.51	121.48	4.83E-02	2429.52

C<sub>0</sub> (mg/l) = 6089.03

**Tabla 4: Resultados del ANOVA**

Fuentes de variación	Grados de libertad	Sumas de cuadrados	Cuadrados Medios	F
Tratamientos	2	5.90E-04	2.95E-04	0.0251
Bloques	9	0.0303	3.37E-03	
Error	18	0.2119	1.18E-02	
Total	29	0.2833		

El valor de la F tabulada para  $\alpha = 0.05$  es:  $F_{(2,18)} = 3.55$

El anterior resultado indica que no existe diferencia significativa entre los tres métodos, es decir, entre los tres modelos de isotermas. Sin embargo, no se puede inferir que los modelos sean precisos, que se ajusten bien a los datos experimentales. Para esto, fue necesario realizar

pruebas de bondad de ajuste entre cada modelo y los datos experimentales.

En la Tabla 5, se presentan los valores de X/M experimentales, así como los estimados por los tres modelos estudiados.

**Tabla 5: Comparación de los resultados experimentales (X/M en mg/l por mg de carbón) con los obtenidos de los modelos de isotermas**

	Concentración del lixiviado (mg/l)									
	5662	5473	5112	4677	4513	3709	3684	3856	3914	3660
<b>Resultados experimentales</b>	82.6	59.4	64.2	69.9	62.6	78.5	68.3	55.3	48.1	48.3
<b>Modelo de Langmuir</b>	68.0	67.3	65.2	62.7	61.8	56.6	56.5	57.0	57.6	56.0
<b>Modelo de Freundlich</b>	69.8	68.9	66.8	64.2	63.3	58.4	58.2	59.0	53.8	57.9
<b>Modelo BET</b>	95.1	69.6	49.7	42.3	42.0	95.5	91.9	63.2	58.2	94.4

Con base en los resultados anteriores, los valores de la  $\chi^2$  fueron: 15.7 para la isoterma de Langmuir, 13.6 para el modelo de Freundlich y 80.6 para el de BET; mientras que la  $\chi^2$  tabulada para 8 grados de libertad y  $\alpha = 0.05$ , fue de 2.73, por lo que se concluye que ninguno de los modelos se ajusta a la forma en que se realiza la adsorción de los lixiviados.

En las Figuras 2 y 3, se presentan los % de remoción de DQO en las columnas de carbón activado para 4 y 8 horas de tiempo de retención respectivamente. En ellas puede observarse que las eficiencias de remoción de DQO se redujeron del 60 al 30% durante las primeras 60 horas cuando el tiempo de retención fue de 4 horas y durante las primeras 80 horas cuando el tiempo de retención fue

de 8 horas. Si se toma en cuenta que la DQO influente era de 6089 mg/l los efluentes del proceso de adsorción son todavía muy contaminates, por lo que

se requeriría de otro tratamiento (ya sea previo o posterior) para poder disponer de ellos.

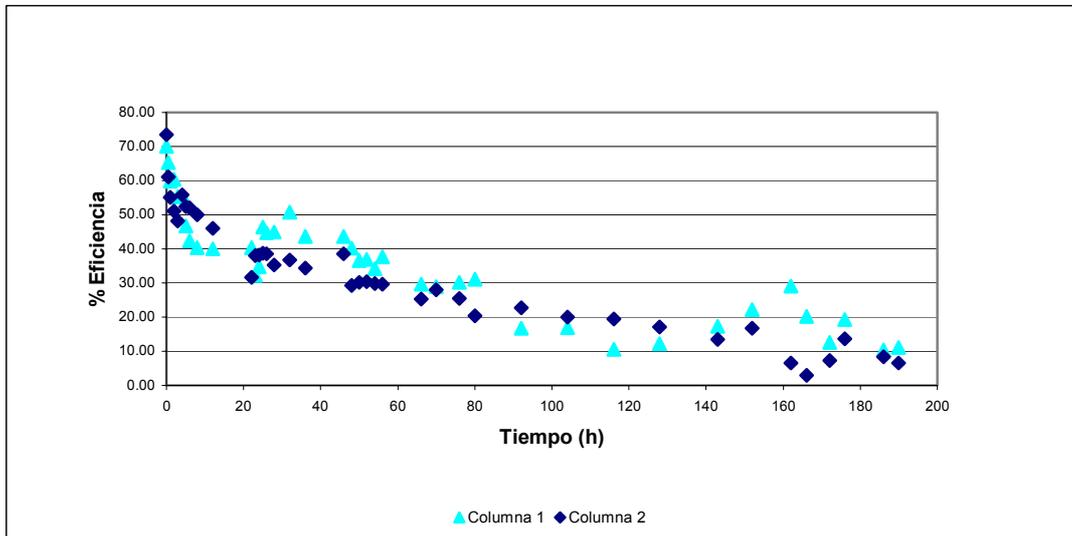


Figura 2: Curva de eficiencia de remoción de DQO para TRH = 4 horas

En la Figura 4, se presentan los resultados del % de remoción de DQO para tiempo de contacto de 8 horas para lixiviado normal y para lixiviado al que previamente se le ajustó el pH a 2. Los comportamientos de ambas curvas son semejantes, pero las remociones del lixiviado al que previamente se le redujo el pH, son superiores. Esto puede deberse a que al bajar el pH, las partículas coloidales se

desestabilizan y forman microfloculos que son removidos por carbón, mientras que las partículas coloidales en el lixiviado normal son pobremente removidas. Las eficiencias de remoción de DQO para el lixiviado con pH 2, se redujeron del 90 al 60% durante las primeras 200 horas, mientras que para el lixiviado normal durante el mismo período de tiempo fue de 65 al 38%.

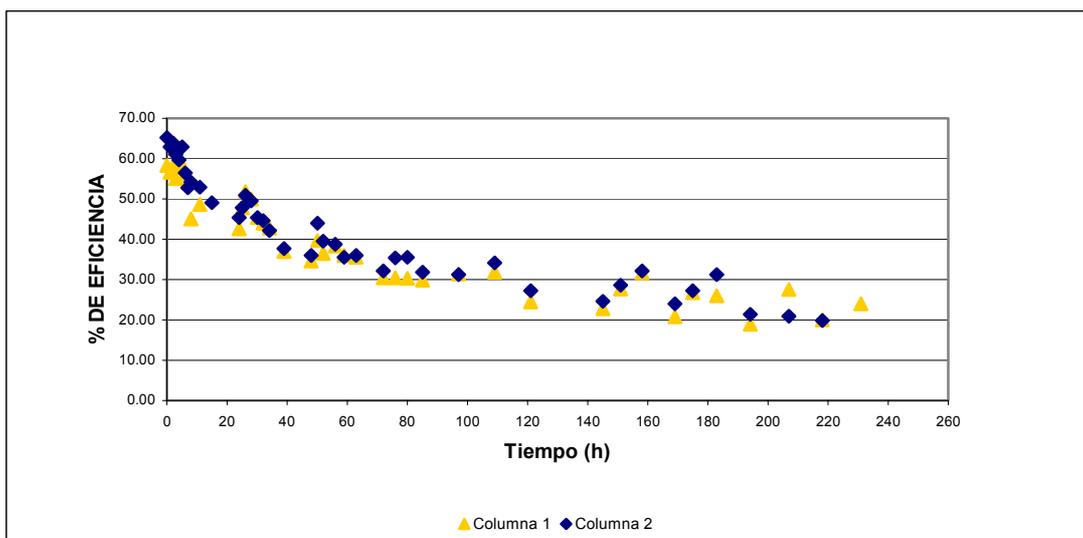


Figura 3: Curva de eficiencia de remoción de DQO para TRH = 8 horas

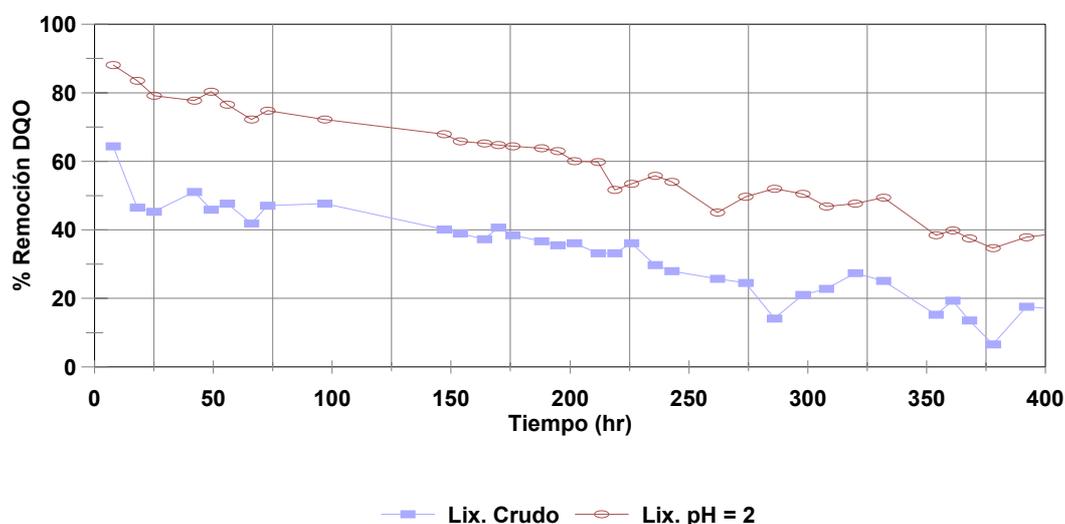


Figura 4: Comparación de remociones de DQO para lixiviado crudo y lixiviado con pH 2 para TRH = 8 horas

### CONCLUSIONES

- Se obtuvieron eficiencias de remoción de DQO del 60 al 90% en lixiviados a los que se les ajustó el pH a 2 y de 65 al 38% a los lixiviados crudos, ambos con 8 horas de tiempo de contacto.
- Ninguno de los modelos de isoterma ensayados (Langmuir, Freundlich y BET) se

ajustaron a los datos experimentales de la adsorción de materia orgánica de lixiviados por carbón activado.

- Los lixiviados estudiados poseen poca materia orgánica suspendida y los tamaños de partículas se encuentran en el rango de 0 a 75  $\mu$ m, con un valor medio de 23  $\mu$ m.

### REFERENCIAS

- APHA-AWWA-WPCF (1989), "Standard Methods for Examination of Water and Wastewater", 18<sup>th</sup> Edition, USA.
- Coulter, R. G., Mahoney, E. M. (1997), "Selecting optimum technology mixes for landfill leachate treatment", *Air & Waste Management Association*, Canada.
- Cheremisinoff P., Ellerbusch F (1978), "Carbon Adsorption Handbook", *Ann Arbor Scienc.* USA.
- Ehrig H., (1999), "Cantidad y contenidos de lixiviados en rellenos de desechos domésticos", CEPIS/OPS
- Jialong W., Yi Q., Horan N. & Stentiford E. (2000), "Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass", *Bioresource Technology*, UK.
- LaGrega M., Buckingham P., Evans J. (1994), "Hazardous Waste Management", *McGraw-Hill*, USA

Noll K., Vassilios G., Sunho W (1992), "Adsorption Technology: for air and water pollution control", *Lewis Publishers*. USA.

Waritch M. A. & Sharma R. (1998), "Technical review of methods to enhance biological degradation in sanitary landfills", *Water Quality Research Journal of Canada*, V.33, No. 3.