

Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto

Méndez Novelo, R.¹, Novelo López, A., Coronado Peraza, V., Castillo Borges, E. y Sauri Riancho, M. R.

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2007 – Fecha de aceptación: 10 de enero de 2008

RESUMEN

El objetivo general del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida mediante el proceso de flotación con adición de coagulantes. Se realizaron ensayos de flotación por aire disuelto (FAD) probando 3 presiones (3, 4 y 5 kg/cm²); con una dosis de coagulante de 300 mg/l de cloruro férrico, a 3 valores de pH ácidos (1, 2 y 3) y 3 valores de pH alcalinos (10, 11 y 12). Los porcentajes máximos de remoción obtenidos en las pruebas de flotación fueron 36.8% para la DQO, 38.5% para los SST y 29.7% para los ST y las mejores presiones y pH que se encontraron son los siguientes: para la DQO la mejor presión y pH fueron de 5 kg/cm² y pH = 2, respectivamente; para los SST la presión de 3 kg/cm² y pH = 1 y para los ST la presión de 3 kg/cm² y pH = 1. Los porcentajes máximos de remoción obtenidos en las pruebas para los metales pesados son los siguientes: Fe 37.4%, Cu 43.2%, Ni 25.7%, Mn 24.3%, Cd 84.6, Pb 90.1% y Zn 52.1%; en el caso de los metales pesados no se pudo establecer una presión y pH óptimos ya que para cada metal fue diferente. Los % de remoción de materia orgánica y de metales pesados obtenidos con este tratamiento son similares a los obtenidos con el proceso coagulación floculación, pero menores que los obtenidos con otros tratamientos fisicoquímicos tales como oxidación Fenton o adsorción.

Palabras clave: Flotación por aire disuelto, lixiviados, metales pesados, coagulante, relleno sanitario, tratamiento fisicoquímico.

Leachate treatment by flotation

ABSTRACT

The general objective of this work was to evaluate the efficiency of the flotation process with coagulants addition as a contaminant remover, when it is applied to treat leachates from the landfill of the city of Merida. Trials of dissolved air flotation (DAF) were made testing 3 different pressures (3, 4 and 5 kg/cm²); with one dose of coagulant of 300 mg/l of ferrous chloride, at 3 different values of acid pH (1, 2 and 3) and 3 of alkaline pH (10, 11 and 12). Organic mater removal measured as COD, TSS and TS were obtained. Heavy metals removals were also determined. The maximum percentages of removal obtained in the flotation trials were 36.8% for COD, 38.5% for TSS and 29.7% for TS. The best pressures and pH found were the following: for COD, 5 kg/cm² and 2 respectively; for TSS and TS, 3 kg/cm² and 1. The maximum removal percentages obtained for heavy metal were: Fe 37.4%, Cu 43.2%, Ni 25.7%, Mn 24.3%, Cd 84.6%, Pb 90.1% and Zn 52.1%; an optimal pressure and pH were not found for heavy metals, because each metal had different behavior. The percentages of organic matter removal and obtained heavy metals with this treatment are similar to the ones obtained with the clotting flocculation process, but smaller than the ones obtained with other such physiochemical treatments as oxidation Fenton or adsorption.

Keywords: Dissolved air flotation, leachates, heavy metals, coagulant, sanitary landfill, physicochemical treatment.

¹ Profesor-Investigador del cuerpo académico de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería de la universidad autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. E-mail: mnovelo@uady.mx

Introducción

La flotación es una operación unitaria utilizada para separar las partículas líquidas o sólidas de baja densidad de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo burbujas finas de gas (generalmente aire) en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascendente (Principio de Arquímedes) del conjunto de partículas y burbujas de gas es tal, que hace que la partícula ascienda a la superficie. De esta forma se pueden remover partículas de densidad menor que el líquido. Una vez que las partículas se hallan en la superficie, pueden recogerse mediante un rascador superficial (Metcalf-Eddy, 1988).

Existen tres métodos de flotación utilizados en el tratamiento de aguas residuales: flotación por aire a presión atmosférica, flotación por aire disuelto (FAD) y flotación por vacío. En el modelo de flotación por aire disuelto, el aire se inyecta en el agua residual a presión y posteriormente se procede a la liberación de la presión hasta alcanzar la presión atmosférica.

El agua se mantiene en un tanque de retención bajo presión, durante varios minutos, para dar tiempo a que el aire penetre en el agua (de acuerdo con la Ley de Henry). Posteriormente se deja pasar el agua por una válvula para liberar la presión y luego se conduce al tanque de flotación donde el aire deja de estar en disolución y se desprende en forma de burbujas diminutas por todo el volumen del líquido, las cuales al ascender arrastran a la superficie las partículas que se pretenden eliminar.

Normalmente, se suelen añadir determinados compuestos químicos para facilitar el proceso de flotación (Herrera, 2003). En su mayor parte, estos reactivos químicos funcionan de manera que crean una superficie o una estructura que permite absorber o atrapar fácilmente las burbujas de aire. Los reactivos químicos inorgánicos, tales como las sales de hierro o de aluminio y la sílice activada, se emplean para agregar las partículas sólidas, de manera que se cree una estructura que facilite la absorción de las burbujas de aire. También se pueden emplear diversos polímeros orgánicos para modificar la naturaleza de las interfases aire-líquido, sólido líquido, o de ambas a la vez. Por lo general, estos compuestos actúan situándose en la interfase para producir los cambios deseados (Crites & Tchbanoglous, 2000). Varios de los aditivos químicos son utilizados para ayudar a la flotación alterando las propiedades superficiales de las fases implicadas (Rich, 1963).

La flotación está expandiendo su potencial en varias áreas, en especial en el tratamiento de aguas de procesos y efluentes de la industria minero-metalúrgica. Los nuevos equipos y las técnicas disponibles permiten la

remoción efectiva de: iones, sólidos en suspensión, DQO, etc. (Santander, 2001).

Lepri *et al.* (2000) reportan eficiencias del 80% de remoción de materia orgánica en compuestos orgánicos de aerosoles acuosos, mediante el proceso de flotación. Huang *et al.* (2000) reportan la remoción de metales pesados en aguas residuales, absorbidos por coloides utilizando el cloruro de poli aluminio como coagulante y la flotación como método de remoción.

En estudios realizados en un relleno sanitario, Abduli *et al.* (2003) reportan la existencia de metales pesados disueltos en sus lixiviados que pueden ser removidos a valores altos de pH, y también reportan que se encontraron metales pesados absorbidos por partículas suspendidas en dichos lixiviados que pueden ser removidos a valores bajos de pH.

Chen *et al.* (2000), en estudios realizados en aguas residuales de restaurantes utilizando el método de flotación para remoción de materia orgánica reportan remociones de DQO del 60%, SST 86% y ST más de 87%, así también, estudios realizados en aguas residuales domésticas por Mels *et al.* (1999) reportan remociones de DQO del 80% usando el método de flotación.

En estudios realizados en aguas residuales domésticas utilizando la flotación como método de remoción para metales pesados distintos autores reportan remociones obtenidas para distintos metales, Adeyiga *et al.* (2000) reportan remociones de Pb 96%, Ni 61% y Zn 71 %, Pavlovska, *et al.* (2003) reportan remociones de Cd 99%, Mn 99% y Feris *et al.* (2002) reportan remociones de Zn 89%, Cu 81%, Ni 67%.

La flotación se ha probado con éxito en diferentes tipos de aguas residuales como los de la industria metalúrgica, los de la petroquímica, farmacéuticas, aguas municipales, etc. No obstante ha sido poco estudiada para el tratamiento de lixiviados.

Los lixiviados son el resultado de la percolación e interacción de las aguas con los desechos almacenados en rellenos sanitarios y representan un peligro potencial al medio ambiente.

Para su tratamiento, se han ensayado la mayoría de los tratamientos de las aguas residuales, pero la variabilidad de su composición y de su generación hace que sea muy complejo su tratamiento. Para lixiviados de rellenos jóvenes, en los que el índice de biodegradabilidad (DBO₅/DQO) es alto se han probado con éxito tratamientos biológicos, especialmente los anaerobios. Para lixiviados de rellenos sanitarios más antiguos, se

utilizan una combinación de tratamientos fisicoquímicos y biológicos o solamente fisicoquímicos.

Una característica de los lixiviados es que la mayoría de los sólidos que poseen se encuentran disueltos y que por lo tanto su remoción por el proceso de coagulación–floculación–sedimentación resulta poco eficiente. Méndez *et al* (2005) reportan eficiencias de remoción de materia orgánica (DQO) en lixiviados superiores al 40% a valores de pH = 2. Esta remoción es principalmente de partículas coloidales de pequeño tamaño que le infieren color al lixiviado. No obstante, los sólidos suspendidos se incrementaron en la prueba de jarras, lo que indica que parte de los coloides de pequeño tamaño, o de material disuelto (los cuales no se incluyen en la determinación de los SST), fueron aglutinados, pero no alcanzaron a ser removidos en la sedimentación. Por este motivo, se ensayó el proceso de flotación en lixiviados del mismo relleno sanitario para determinar la eficiencia de remoción mediante este proceso con adición de coagulantes.

Metodología

Caracterización. Se realizaron 7 muestreos de lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida y se determinaron los siguientes parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Turbiedad, pH, Alcalinidad, Grasas y aceites. También se determinaron los metales pesados: Fe, Cu, Ni, Mn, Cd, Pb, Zn, Na, K y Ag, que se midieron en un equipo de absorción atómica (Varian modelo spectrAA-250plus). Todas las determinaciones se realizaron de acuerdo con la APHA-AWWA-WPCF (1998).

Optimización del proceso. Se realizaron ensayos de flotación por aire disuelto (FAD) probando 3 presiones diferentes (3, 4 y 5 kg/cm²), con una dosis de coagulante de 300 mg/l de cloruro férrico y 3 valores de pH ácidos (1, 2 y 3) y 3 valores alcalinos (10,11 y 12). Estos ensayos se realizaron por triplicado y los resultados se analizaron con un modelo de varianza para determinar si la presión y el pH influyen en la remoción de DQO, SST, ST y los metales.

Modelo experimental. El modelo utilizado está conformado por los siguientes componentes: Un tanque de acero de 10 litros de capacidad, equipado con un conducto que permita la entrada y salida de los

lixiviados, así como la entrada de aire a presión; un manómetro de Bourdon que permite realizar lecturas de presión requeridas; una válvula de compuerta para liberar la presión; un compresor portátil que permite elevar la presión y que trabaja con corriente directa o alterna, lo que permite trasladar el equipo para la ejecución de prácticas y determinaciones de campo y un cilindro graduado (Probeta) de 2 litros de capacidad como se puede observar en la Figura 1.

Resultados y discusión

Los resultados de la caracterización se presentan en la Tabla 1. Los valores de contenido de materia orgánica corresponden a los lixiviados intermedios entre la etapa acidogénica y la metanogénica, más próximos a esta última. Slomczyńska (2004) reporta valores promedio de la DQO de lixiviados de 8 plantas de Noruega y los EUA de 7246 mg/l, pero hace una distinción entre las características de los lixiviados en las etapas acidogénica y metanogénica a las que les asigna valores promedio de 22000 y 3000 mg/l, respectivamente. Esta comparación, debe tomarse con reserva, dado que en el caso del relleno sanitario de la ciudad de Mérida, los lixiviados caracterizados corresponden a una mezcla de lixiviados generados en celdas de diferentes edades y que son sometidas a evaporación, aporte de agua pluvial y recirculado.



Figura 1. Instrumentos para realizar las pruebas de Flotación

Tabla 1. Caracterización de lixiviados

Parámetro	Unidad	Rango	Media	Parámetro	Unidad	Rango	Media
<i>pH</i>		7.92 - 8.30	8.07	<i>O₂</i>	(mg/l)	0.24 - 0.55	0.45
<i>Conductividad</i>	(mS/cm)	17.1 - 18.5	17.9	<i>SST</i>	(mg/l)	103 - 153	127
<i>*Alcalinidad</i>	(mg/l)	548 - 750	659	<i>SSV</i>	(mg/l)	89 - 101	95
<i>*Dureza total</i>	(mg/l)	840 - 1176	943	<i>ST</i>	(mg/l)	10245 - 13670	12116
<i>Cloruros</i>	(mg/l)	2899-3654	3660	<i>STV</i>	(mg/l)	2750 - 4505	3776
<i>DBO₅</i>	(mg/l)	236 - 358	306	<i>Redox</i>	(mg/l)	(-133), - (-2)	-49.71
<i>DQO total</i>	(mg/l)	4268 - 5323	4750	<i>Fe</i>	(mg/l)	7.924 - 8.736	8.542
<i>DQO soluble</i>	(mg/l)	3161 - 4508	3986	<i>Mn</i>	(mg/l)	0.121 - 0.1635	0.142
<i>Temperatura</i>	(°C)	32.1 - 24.2	28.7	<i>Zn</i>	(mg/l)	0.427 - 0.714	0.599
<i>Grasas y aceites</i>	(mg/l)	27 - 35	31	<i>Na</i>	(mg/l)	1631- 1989	1772
<i>SAAM</i>	(mg/l)	5 - 7	6	<i>K</i>	(mg/l)	1636 - 2065	1841
<i>N-NH₃</i>	(mg/l)	795 - 901	824	<i>Cd</i>	(mg/l)	0.0010 - 0.0018	0.00138
<i>N-org</i>	(mg/l)	202 - 320	253	<i>Pb</i>	(mg/l)	0.016 - 0.034	0.025
<i>NKT</i>	(mg/l)	1004 - 1120	1077	<i>Cu</i>	(mg/l)	0.056 - 0.076	0.063
<i>P Total</i>	(mg/l)	20 - 75	51	<i>Ni</i>	(mg/l)	0.3193 - 0.3866	0.349
<i>Sulfatos</i>	(mg/l)	47 - 315	161	<i>Ag</i>	(mg/l)	0.0370 - 0.0388	0.0385

* Expresados como CaCO₃

En la Tabla 2, se presentan los porcentajes de remoción para la DQO, SST y ST para pH bajos (1,2 y3) y pH altos (10, 11 y 12). Las mejores remociones obtenidas fueron: para la materia orgánica medida como DQO fue de 36.8% y se obtuvo a pH 2 y presión de 5 kg/cm²; para

los SST, 38.5% a pH 1 y presión de 3 kg/cm² y para los ST, 29.7% también a pH 1 y presión de 3 kg/cm². En general se observan mejores remociones a valores bajos de pH, lo que concuerda con la hipótesis de que se remueven partículas coloidales de pequeño tamaño.

Tabla 2. Porcentaje de remoción de DQO, SST y ST en lixiviados

Presión (kg/cm ²)	PH	Remoción DQO _B (%)	Remoción SST _B (%)	Remoción ST _B (%)	PH	Remoción DQO _A (%)	Remoción SST _A (%)	Remoción ST _A (%)
3	1	26.7	37.1	29.6	10	15.6	9.5	4.6
3	1	26.9	38.5	29.7	10	15.8	9.8	4.7
3	1	26.9	37.9	29.5	10	15.8	9.7	4.6
3	2	26.6	35.3	29.6	11	17.9	8.6	4.5
3	2	26.9	35.3	29.6	11	18.0	7.4	4.7
3	2	26.5	34.7	29.5	11	18.0	8.1	4.6
3	3	26.0	32.8	29.5	12	17.2	9.5	4.5
3	3	26.2	34.4	29.5	12	17.4	4.9	4.6
3	3	26.1	33.1	29.4	12	17.2	5.7	4.5
4	1	34.7	31.9	27.2	10	17.4	7.8	3.9
4	1	34.5	36.9	27.3	10	17.5	9.0	4.00
4	1	34.5	37.1	27.2	10	17.4	8.9	3.8
4	2	34.5	29.3	27.2	11	12.0	6.0	3.6
4	2	34.4	31.2	27.3	11	12.2	5.7	3.8
4	2	34.3	30.7	27.2	11	12.1	8.1	3.8
4	3	34.4	26.7	27.1	12	12.0	6.9	3.6
4	3	34.3	27.1	27.3	12	11.8	4.9	3.8
4	3	34.3	29.0	27.1	12	11.8	8.9	3.7
5	1	35.7	33.6	27.5	10	16.2	7.8	4.1
5	1	35.9	35.3	27.6	10	16.5	4.9	4.3
5	1	35.9	37.1	27.4	10	16.5	7.3	4.2
5	2	36.6	32.8	27.5	11	15.8	6.9	4.1
5	2	36.8	33.6	27.6	11	16.1	4.9	4.3
5	2	36.8	33.1	27.4	11	15.9	5.7	4.2
5	3	32.2	31.0	27.4	12	13.4	6.5	4.1
5	3	32.4	31.2	27.6	12	13.7	3.3	4.2
5	3	32.3	33.1	27.4	12	13.6	6.5	4.2
Promedio		32.00	33.3	28.1	--	14.3	7.1	4.2

^a Valores altos de pH (10, 11 y 12)

^b Valores bajos de pH (1, 2 y 3)

Los porcentajes de remoción son ligeramente más bajos que los obtenidos en lixiviados del mismo relleno sanitario con el proceso de coagulación floculación (Méndez *et al.*, 2005). En ambos procesos, las mejores remociones se obtienen a valores de pH = 2 y se remueven principalmente partículas coloidales aglutinadas por efecto del coagulante.

Otros procesos fisicoquímicos que se han utilizado para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de la ciudad de Mérida son el de adsorción (Méndez *et al.*, 2002) y el de oxidación Fenton (Méndez *et al.*, 2007). Con el primero se remueven partículas coloidales y disueltas y se alcanzaron eficiencias de remoción (medidas como DQO) del 60%; con el segundo, se oxida la materia orgánica o inorgánica y posteriormente se remueve con un proceso de coagulación y con él se alcanzaron remociones del 77% con base en la DQO.

En la Tabla 3, se presentan los resultados del porcentaje de remoción de los metales pesados para valores de pH bajos (1, 2 y 3) y en la Tabla 4 para valores de pH alto (10, 11 y 12), ambas a tres distintas presiones (3, 4 y 5 kg/cm²).

Tabla 3. Remociones de metales pesados a pH bajos

Presión (kg/cm ²)	pH	Fe (%)	Cu (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cd (%)	Pb (%)	Zn (%)
3	1	19.5	29.5	18.0	3.0	74.8	67.7	22.3
3	1	19.1	29.2	18.2	3.5	74.5	67.0	19.8
3	1	18.6	29.1	18.1	3.1	73.6	67.5	20.6
3	2	21.1	31.2	20.1	6.1	84.5	90.3	43.6
3	2	21.6	30.7	20.7	6.1	84.0	89.6	42.2
3	2	21.5	32.2	21.0	6.3	84.6	90.1	43.5
3	3	34.5	35.2	22.0	5.1	77.1	86.2	35.5
3	3	33.1	35.2	22.2	5.1	76.8	86.1	35.0
3	3	34.2	35.0	22.1	5.2	77.1	86.2	35.3
4	1	18.2	25.1	16.2	2.6	70.3	66.1	20.2
4	1	17.6	25.6	15.9	3.0	70.3	65.8	18.3
4	1	18.4	24.9	16.1	2.7	70.1	65.1	19.2
4	2	19.6	29.7	19.5	5.4	80.3	89.6	41.6
4	2	19.0	29.4	19.2	5.1	80.1	89.5	41.1
4	2	18.9	29.0	19.0	5.2	80.2	89.5	42.0
4	3	26.1	33.1	21.1	5.2	72.6	87.6	33.3
4	3	25.5	33.4	21.0	5.9	71.7	87.0	33.1
4	3	26.3	32.7	21.3	5.2	72.5	86.5	32.5
5	1	18.4	27.5	19.1	3.2	72.2	65.5	21.1
5	1	18.0	27.2	18.9	3.1	72.1	65.0	21.5
5	1	18.2	27.5	19.2	3.0	72.2	65.5	20.3
5	2	22.5	28.1	21.2	4.9	82.5	90.0	42.1
5	2	21.5	28.4	20.6	4.2	82.2	90.1	40.9
5	2	22.2	27.9	21.0	4.1	82.1	89.9	42.1
5	3	30.1	32.2	20.5	5.5	75.1	85.5	33.2
5	3	31.0	32.2	20.0	5.2	74.5	85.4	31.5
5	3	30.4	32.5	20.2	5.3	74.9	83.1	32.5
Promedio		23	30	19	5	76	81	32

Tabla 4. Remociones de metales pesados a pH altos

Presión (kg/cm ²)	pH	Fe (%)	Cu (%)	Ni (%)	Mn (%)	Cd (%)	Pb (%)	Zn (%)
3	10	28.4	43.1	25.4	10.3	40.4	50.2	30.2
3	10	28.2	42.1	24.6	11.0	38.5	51.2	32.3
3	10	27.4	41.8	25.1	10.4	40.3	50.1	33.4
3	11	32.4	42.4	25.5	25.1	36.1	55.1	42.2
3	11	32.1	43.2	25.7	23.5	34.6	55.0	42.2
3	11	32.5	42.2	25.3	24.1	35.3	55.0	40.2
3	12	37.4	42.1	22.5	24.6	42.2	46.2	52.1
3	12	36.5	42.6	20.2	22.4	41.6	45.6	52.1
3	12	37.1	41.9	21.2	22.5	42.2	44.8	52.0
4	10	25.4	38.3	23.7	9.2	38.1	51.1	31.7
4	10	25.1	36.2	23.3	9.0	36.2	51.1	30.2
4	10	24.6	38.2	21.3	10.0	38.1	51.5	33.5
4	11	29.1	41.5	22.2	21.1	32.2	52.2	41.3
4	11	29.6	41.0	21.4	22.3	32.6	52.3	40.1
4	11	29.0	42.1	22.3	21.6	30.5	50.7	39.5
4	12	31.1	40.5	24.3	23.2	41.3	44.6	50.2
4	12	31.1	40.1	24.4	23.1	42.3	40.3	51.0
5	12	31.6	39.5	23.2	22.5	41.1	43.2	50.3
5	10	24.2	40.4	23.1	10.1	39.7	49.8	30.7
5	10	23.2	41.0	23.0	9.2	37.7	50.0	30.6
5	10	24.1	40.5	22.6	11.0	38.0	49.6	30.1
5	11	28.7	41.2	24.2	18.1	34.5	53.2	40.8
5	11	28.5	41.1	23.4	18.2	34.0	52.5	40.2
5	11	26.1	39.9	24.1	19.1	32.6	54.5	41.2
5	12	31.5	40.3	25.0	24.3	40.6	44.1	51.7
5	12	31.2	40.5	24.6	24.0	42.1	43.1	50.2
5	12	30.4	39.6	25.5	23.6	41.2	44.1	51.4
Promedio		30	41	24	18	38	49	41

No se encontraron en la bibliografía consultada experiencias del proceso de flotación para la remoción de metales en lixiviados, sin embargo, para el tratamiento de aguas residuales domésticas existen algunos trabajos: Adeyiga (2000) obtuvo remociones de Pb 96%, Ni 61% y de Zn 71%; Pavlovská (2003) reporta remociones de Cd 98%, Mn 99% y Feris (2002) de 89% de Zn, 81% de Cu y de Ni 67% de Ni.

Las remociones de metales obtenidas en el presente trabajo son: Fe 37.4%, Cu 43.2%, Ni 25.7%, Mn 24.3%, Cd 84.6, Pb 90.1% y Zn 52.1%, por lo que puede observarse que se obtuvieron remociones semejantes en Pb y Cd, pero menores en los otros metales. Los porcentajes de remoción de DQO, SST y SST obtenidos en la pruebas de flotación, son bajos comparados con los datos reportados por Chen (2000) en aguas residuales de restaurantes removidos por flotación, que reporta remociones de DQO de 60%, SST 86%, ST mas de 87%. Mels (1999), también con aguas residuales domésticas y con el proceso de flotación, reporta remociones de DQO del 80%, ya que los porcentajes máximos de remoción obtenidos en las pruebas de flotación son 36.8% de DQO, 38.5% de SST y 29.7% de ST.

Los resultados de los análisis de varianza realizados para la remoción de DQO, SST y ST se sintetizan en la Tabla 5 y en la Tabla 6, los análisis de varianza para la remoción de los metales pesados.

Los modelos aplicados para la remoción de DQO, SST y ST resultaron significativos y en general la mejor presión fue la de 3 kg/cm² y el mejor pH de 1 para valores bajos de pH y de 10 para valores altos de pH. Las mejores presiones y valores de pH se determinaron por el método de Diferencia Significativa Mínima (DSM).

Tabla 5. Significancia del pH y la presión en la estimación de DQO, SST y ST a valores altos y bajos de pH. Mejores valores de presión y pH.

Variables respuesta	α		PH	Presión (kg/cm ²)
	pH	Presión		
DQO _a	0.0228	0.0015	10	3
DQO _b	0.0013	0.0000	1-2	4-5
SST _a	0.0168	0.0099	10	3
SST _b	0.0000	0.0000	1	3
ST _a	0.0430	0.0000	10	3
ST _b	0.1124	0.0000	1	3

^a valores altos de pH (10, 11 y 12)

^b valores bajos de pH (1, 2 y 3)

Los modelos aplicados para los metales pesados, resultaron significativos para algunos de ellos (Fe, Cu, Mn, Cd, Pb y Zn), pero no para todos. La mejor presión para la remoción de metales resultó ser la de 3 kg/cm² a valores de pH de 12.

Tabla 6. Significancia del pH y la presión en la estimación de metales pesados a valores altos y bajos de pH. Mejores valores de presión y pH.

Variables respuesta	α		PH	Presión (kg/cm ²)
	pH	Presión		
Fe _b	0.0163	0.6769	3	---
Cu _b	0.0422	0.0727	3	---
Ni _b	0.4686	0.2064	---	---
Mn _b	0.8124	0.2996	---	---
Cd _b	0.1033	0.7055	---	---
Pb _b	0.0101	0.4285	1	---
Zn _b	0.0103	0.9981	2-3	---
Fe _a	0.0000	0.0000	12	3
Cu _a	0.0244	0.0001	11	3
Ni _a	0.8914	0.2764	---	---
Mn _a	0.0000	0.0449	12	3
Cd _a	0.0000	0.0011	12	3
Pb _a	0.0000	0.0110	11	3
Zn _a	0.0000	0.0523	12	3

^a valores altos de pH (10, 11 y 12)

^b valores bajos de pH (1, 2 y 3)

Conclusiones

Los máximos porcentajes de remoción de materia orgánica en los lixiviados del relleno sanitario, obtenidos en las pruebas de flotación fueron: 36.8% de DQO, 38.5% de SST y 29.7% de ST.

Los máximos porcentajes de remoción de metales pesados en los lixiviados del relleno sanitario, obtenidos en las pruebas de flotación fueron: Fe 37.4%, Cu 43.2%, Ni 25.7%, Mn 24.3%, Cd 84.6, Pb 90.1% y Zn 52.1%.

Se obtuvieron mejores remociones de materia orgánica medida como DQO, SST o ST a valores bajos de pH (1, 2 y 3) que a valores altos de pH (10, 11 y 12).

Las mejores remociones de materia orgánica medida como DQO se obtuvieron con pH = 2 y la presión de 5 kg/cm².

No se encontraron un valor de pH y una presión de operación que optimicen la remoción de metales pesados de manera global, sino que cada metal tuvo condiciones de pH y presión que optimizan el proceso de flotación.

Referencias Bibliográficas

- Adeyiga A., Hu L., Creer T., (2000). Removal of metal ions from wastewater with natural wastes. School of Engineering and Technology, Hampton University, Hampton, VA 23668.
- APHA-AWWA-WPCF. (1998). Standard Methods for examination of water and wastewater. Ed. by Water Environment Federation, U.S.
- Chen Guohua, Chen Xueming, Yue Po Lock. (2000). Electrocoagulation and Electroflotation of restaurant wastewater. Journal of Environmental Engineering / september 2000 / 863.

- Crites R., Tchbanoglous G., (2000). Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Editorial McGraw-Hill.
- Feris L. A., Souza M. L., Rubio J., (2002). Sorption of Heavy Metals on a Coal Benefication Tailing Material: II. Adsorptive Particulate Flotation. Environmental Engineering Department. Universidade Luterana do Brasil, Canoas, Brasil.
- Herrera R. (2003). Recent developments and advances in formulations and applications of chemical reagents used in froth flotation. Mineral Processing & Extractive Metall. Vol. 24, pp.139-182.
- Mels A. R., Rulkens W. H., Van Der Meer A. K., Van Nieuwenhuijzen A. F., Klapwijk A., (1999). Flotation with polyelectrolytes as a first step of a more sustainable wastewater treatment system. Department of Agro, Environmental and Systems Technology. Wageningen University, P.O. Box 8129, NL-6700 EV, Wageningen, The Netherlands.
- Méndez N., Castillo E., Sauri M., Quintal F., Giacomán V. Jiménez B., (2005). "Physicochemical treatment of Mérida landfill leachate for chemical oxygen demand reduction by coagulation", Waste Management & Research, Vol. 23, No. 6, pp. 560-564.
- Metcalf, Eddy, (1988). Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales. 7ª edición. Ed Labor S.A., España.
- Pavlovska G., Cundeva K., Stafilov T., Zendelovska D., (2003). Flotation Method for Selective Separation of Silver, Cadmium, Chromium, Manganese, Thallium, and Zinc from Aragonite Before Atomic Absorption Spectrometric Determination. Institute of Chemistry, Faculty of Science, and 2Institute of Preclinical and Clinical Pharmacology with Toxicology, Faculty of Medicine, Sts. Cyril and Methodius University, Skopje, Macedonia.
- Rich L. G., (1963). Operaciones Unitarias de Ingeniería Sanitaria. Editorial Compañía Editorial Continental.
- Santander M., Souza L., Rubio J., (2001). Flotación como proceso de remoción de contaminantes. III. Nuevas técnicas y equipos. Depto. Ingeniería de Minas, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- SEMARNAT, (1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminación en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación.
- Slomczyńska, Slomczynski, (2004), Physico-chemical and toxicological characteristics of leachates from MSW Landfills. Institute of Environmental Engineering systems and Biology, Warsaw University of Technology. 20 nowowiejska Str. 00_653 Warsaw, Poland.
- Trebouet D., Schlumpf J. P., Jaquen P., Quemeneur F., (2001). Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical-nanofiltration processes. Elsevier Science Ltd.

Este documento se debe citar como:

Méndez Novelo, R., Novelo López, A., Coronado Peraza, V., Castillo Borges, E. y Sauri Riancho, M. R. (2008). **Remoción de materia orgánica y metales pesados de lixiviados por flotación con aire disuelto.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-1, pp. 13-19, ISSN: 1665-529X