

# **EVALUACIÓN DE CAL, SULFATO E HIDROXICLORURO DE ALUMINIO EN LA COAGULACION-FLOCULACION DEL LIXIVIADO DEL RELLENO SANITARIO DE POZA RICA, VERACRUZ**

## **EVALUATION OF CAL, SULFATE AND ALUMINUM CHLOROHYDRATE IN COAGULATION-FLOCCULATION LEACHATE LANDFILL POZA RICA, VERACRUZ**

**Israel Hernández<sup>1\*</sup>, Ranulfo O. González<sup>1</sup>, Francisca Sandoval<sup>1</sup>,  
José L. Galván<sup>1</sup>, Raúl E. Contreras<sup>1,2</sup>**

(1) Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Prolongación de la Ave. Venustiano Carranza, C.P. 552, Zona Poza Rica, Tuxpan, Veracruz - México

(2) Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, División de Estudios de Posgrado, J. Rosas y J. Uruerta s/n, Col. Los mangos, Cd. Madero, Tamaulipas - México

\*autor de contacto (e-mail: huejutal@hotmail.com)

*Recibido: 16/11/2012 - Evaluado: 23/01/2013 - Aceptado: 15/03/2013*

### **RESUMEN**

En el presente artículo se reporta el proceso de clarificación del lixiviado de un basurero de la Ciudad de Poza Rica de Hidalgo, Veracruz, con este fin se utilizó como coagulantes óxido de calcio, sulfato e hidroxiclорuro de aluminio. El CaO no presentó capacidad floculante para el lixiviado tratado bajo ninguna de las condiciones ensayadas. El  $Al_2(SO_4)_3$  mostró buena actividad floculante al tratar el lixiviado obteniéndose 0.97 NTU en el índice de turbidez con 2250 ppm del sulfato de aluminio, por la elevada cantidad de floculante el proceso caro; por otra parte, la floculación de los sólidos suspendidos en el lixiviado se logró una mayor extensión empleando 1.5 ppm de  $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$  obteniendo un índice de turbidez de 0.83 NTU, con pH de 7.63.

### **ABSTRACT**

This paper reports the process of clarification of a landfill leachate in City Poza Rica de Hidalgo, Veracruz; for this purpose it was used as coagulants oxide, calcium sulfate and aluminum chlorohydrate. The CaO did not present flocculant capacity for leachating treated under any of the conditions tested. The  $Al_2(SO_4)_3$  showed good flocculant activity when treating the leachate obtained in the index 0.97 NTU turbidity with 2250 ppm of aluminum sulfate due to the high amount of expensive process flocculant; on the other hand, flocculation of suspended solids in the leachate was achieved to a greater extent using 1.5 ppm of  $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$ , obtaining an index of 0.83 NTU turbidity, pH 7.63.

Palabras clave: lixiviado; coagulación-floculación; sulfato de aluminio; hidroxiclорuro de aluminio  
Keywords: leachate landfill; coagulation-flocculation; aluminum sulphate; aluminum chlorohydrate

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento del agua es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua cruda con el fin de remover o reducir sus contaminantes y lograr que sus características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas cumplan las especificaciones contenidas en las normas que regulan la materia (Cartwright, 2009). El agua debe ser tratada debido a la presencia de impurezas como sólidos suspendidos, materiales colorantes, microorganismos, materia orgánica, gases disueltos, minerales y otros.

Los lixiviados son líquidos altamente contaminantes en los que se han ensayado diferentes tratamientos, tanto biológicos (aerobios o anaerobios) como fisicoquímicos (Coulter & Mahoney, 1997). La selección del proceso de tratamiento de lixiviados es una tarea compleja (Longsdon *et al.*, 2002).

Muchas han sido las contribuciones en el tratamiento de los lixiviados (González & Valdivia, 2001), trataron lixiviados como un aporte adicional a las aguas residuales, en un sistema de lodos activados. Matarán *et al.* (2003), utilizaron filtros inundados en el tratamiento de lixiviados procedentes de residuos sólidos urbanos. La empresa Air Liquide España, S. A., ha consumido oxígeno puro en dos plantas de depuración de lixiviados (Parra, 1999).

En las últimas décadas el tratamiento de lixiviados se ha perfeccionado considerablemente y se han vuelto más confiables. Muchos vertederos europeos incluyen ahora plantas bien diseñadas y construidas que permiten tratar los lixiviados de forma consistente con los niveles de limpieza específicos requeridos (Robinson & Last, 1999). Las características químicas de los lixiviados varían de manera significativa en función de numerosos factores como son: el clima, la edad del relleno, la composición de la basura y la geología del terreno (Peng *et al.*, 2008). Rivas *et al.* (2004), estabilizaron lixiviados con un procesos secuencial de coagulación-floculación más oxidación química. Tasi *et al.* (2003), utilizaron coagulación-floculación como pretratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Wang *et al.* (2002), utilizaron procesos de coagulación y foto-oxidación en el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios. Droppelmann y Oettinger (2009), estudiaron el comportamiento de un lodo activado en cuanto a su capacidad para remover la demanda biológica de oxígeno (DBO) y el nitrógeno amoniacal de un lixiviado previamente tratado en una laguna anaeróbica.

En México, pocos son los rellenos sanitarios que cuentan con el tratamiento de sus lixiviados; por consiguiente es necesario proponer procesos ambientalmente sustentables, que sean técnicamente realizables, económicamente viables y socialmente aceptables. Méndez *et al.* (2002), determinaron 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 de 2. Monje y Orta (2004), removieron y transformaron materia orgánica recalcitrante para estabilizar lixiviado salino de relleno sanitario. Posteriormente, Méndez *et al.* (2010), trataron el lixiviado de la ciudad de Mérida Yucatán México, por el proceso Fenton el cual consiste en tratar la carga contaminante con una combinación de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> y FeSO<sub>4</sub> en condiciones ácidas.

En la actualidad, el uso de polímeros como ayudantes de coagulación y floculación está bastante extendido y es práctica corriente en muchas plantas de tratamiento de agua, principalmente en países industrializados. Coagulantes y floculantes típicos incluyen (Metcalf & Eddy, 2003) polímeros orgánicos naturales y sintéticos, sales de metales como alumbre o sulfato férrico, y metal prehidrolizado como el cloruro de polialuminio (PACI) e Hidroxicloruro de aluminio. Cogollo (2011), estudio el proceso de clarificación de aguas industriales utilizando un coagulante inorgánico polimerizado (hidroxicloruro de aluminio).

El presente trabajo estudia la coagulación-floculación del hidroxicloruro de aluminio, sulfato de aluminio y la cal en el lixiviado proveniente del relleno sanitario de la ciudad de Poza Rica de Hgo. Veracruz, México.

## **MATERIALES Y METODOS**

### Muestra de Lixiviado

El lixiviado utilizado proviene del Relleno Sanitario de la Ciudad de Poza Rica de Hgo., Veracruz, México, ubicado en carretera a Santa Agueda S/N, Col. Halliburton (20°31'46.36" y 97°24'44.84"). Se tomaron seis muestras por triplicado, en verano y con un clima caluroso, del cárcamo de recepción del lixiviado, conformando la muestra de análisis (NOM-MX-001-1996).

### Análisis fisicoquímico del lixiviado

Para evaluar la eficiencia del floculante se determinaron parámetros como: pH, Temperatura, Turbidez, Salinidad, Sólidos disueltos totales, Conductividad. Los parámetros pH y Temperatura se realizaron con el equipo de sonda HANNA modelo HI 9828, el parámetro de Turbidez en el equipo HANNA modelo HI 93703 y los parámetros restantes se efectuaron con el equipo de sonda HACH modelo CO150. Con la finalidad de tener una caracterización más completa del agua tratada con los tres coagulantes se realizó además de los parámetros anteriores, el oxígeno disuelto (OD) analizada con el método de azida de sodio, la demanda química de oxígeno (DQO) analizada con el método digestión con reactor en el espectrofotómetro HACH modelo DR/2010, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), y coliformes totales y fecales por MILLIPORE, estas determinaciones se realizaron al agua obtenida después de la floculación en los puntos óptimos de clarificación.

### Evaluación de los coagulantes mediante pruebas de Jarras

La prueba de Jarras se llevó a cabo de acuerdo a la metodología propuesta por Arboleda (2000), en la cual se determina la cantidad necesaria de coagulante para la clarificación del lixiviado, utilizando parámetros como turbidez, pH, sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST) y conductividad. El ensayo se realizó por triplicado con las dosis seleccionadas a la muestra recolectada, con el fin de obtener datos confiables. Los coagulantes utilizados para dichas pruebas son: Cal hidratada, Sulfato de Aluminio e Hidroxicloruro de Aluminio.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### Análisis de lixiviados

La muestra de lixiviado se tomó en el mes de Septiembre de 2011, la temperatura ambiente al momento de la toma de muestra fue de 35 °C, pero la muestra se guardó en un recipiente a 25 °C. En la Tabla 1, se muestran los análisis de la composición inicial del lixiviado, de la Ciudad de Poza Rica de Hgo. Veracruz, México, realizados en el laboratorio de investigación de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Veracruzana.

### Efectividad de los coagulantes

Las pruebas de jarras realizadas a fin de evaluar la funcionabilidad de los coagulantes utilizados, permiten comparar la efectividad de coagulación de la cal hidratada (CaO), sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>) e hidroxicloruro de aluminio (Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub>\*5H<sub>2</sub>O), sobre los lixiviados recolectados en el relleno sanitario.

Para medir los resultados de la prueba de coagulación-floculación se utilizaron parámetros (SST y Turbiedad) que convencionalmente se utilizan para pruebas de coagulación en agua potable, dado que son económicas y rápidas de efectuar.

Tabla 1: Caracterización del lixiviado.

Parámetro	Unidades	Lixiviado
Turbidez	NTU	11.69
pH	-----	8.01
Temperatura	°C	25
Conductividad	μS/cm	4.31
Salinidad	%	2.3
SDT	ppm	2220
SST	ppm	0.75
Oxígeno disuelto	mg/L	0
DBO <sub>5</sub>	mg/L	494
DQO	mg/L	1,482
Coliformes totales	UFC/100mL	373,000
Coliformes fecales	UFC/100 mL	86,000

### Remoción de turbiedad

En relación a la remoción de turbiedad, con la cal, se realizó esta prueba para la clarificación del lixiviado, sin embargo dadas las características fisicoquímicas especiales de este fluido no hubo floculación a ninguna concentración.

La cantidad de sulfato de aluminio requerida para proporcionar la máxima claridad del lixiviado (2250 ppm), lo cual resulta sorprendente e indica una composición muy compleja de este fluido, la actividad química del coagulante favoreció una disminución notable del pH, lo cual generó una mayor solubilidad de los sólidos disueltos que son químicamente afines. En la Figura 1, se muestra el comportamiento de la turbidez en el lixiviado tratado con este coagulante.

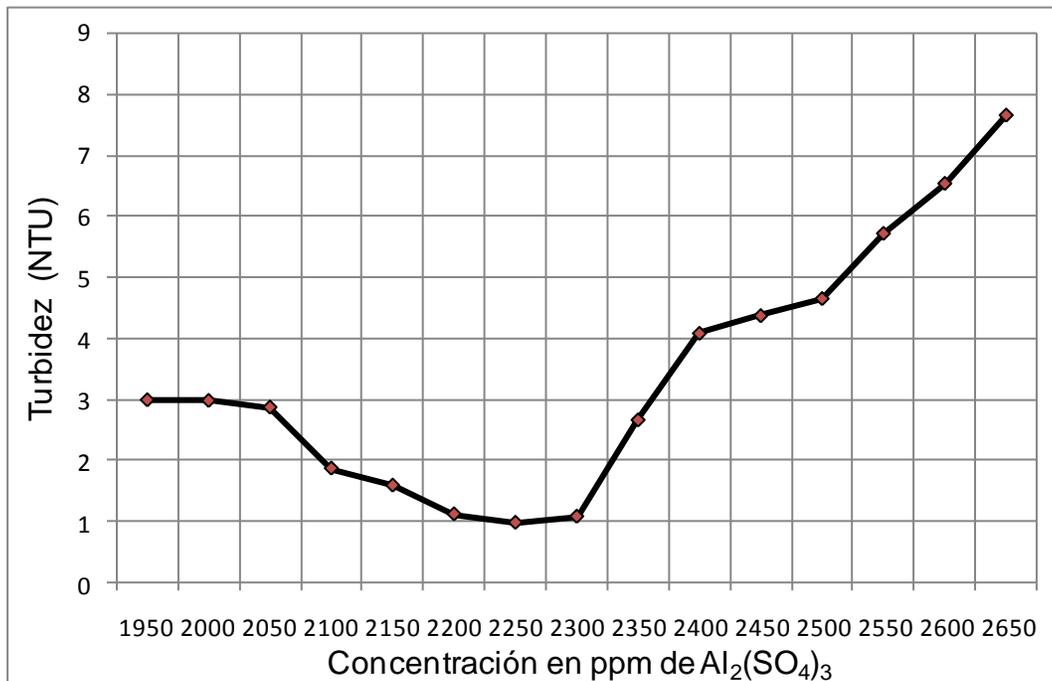


Fig. 1: Comportamiento de la turbidez en el lixiviado con sulfato de aluminio, como coagulante.

La Figura 1 muestra la eficiencia del sulfato de aluminio sobre la turbidez del lixiviado tratado con 0.97 NTU. La máxima claridad del lixiviado se obtiene empleando 2250 ppm de este floculante, lo cual encarece mucho el proceso, la adición del floculante redujo el pH del lixiviado. Los valores de los parámetros de conductividad y salinidad corroboran esta afirmación porque también se han incrementado al disminuir el pH y obtenerse una solución final más ácida. Mejorando lo obtenido, en cuanto a la clarificación pero no a la cantidad de concentración del coagulante; por Laines *et al.* (2008), al reducir la turbiedad de <5 NTU con 75 mg/L, utilizando coagulante convencional de sulfato de aluminio y con la mezcla coagulante LASA55; pero comparables con el 97% de reducción de turbiedad obtenidos por Amokrane *et al.* (1997), utilizando como coagulantes al cloruro férrico y sulfato de aluminio.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 2, la concentración óptima del coagulante para el lixiviado tratado es de 1.5 ppm, con una turbidez de 0.83 NTU, en este caso también disminuye el pH de 8.01 a 7.63, mostrando un incremento notable en los sólidos disueltos totales de 2,220 a 2,350 ppm, y un ligero aumento tanto en la conductividad (4.31 a 4.53  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) como la salinidad (2.3 a 2.4 %). Lo cual reafirma lo obtenido por Cogollo (2011), con una turbiedad en agua cruda de 0.87 NTU pero mejora la dosis de 24 ppm; de la misma manera que mejora la eficiencia del 90% en lixiviados, para el sulfato de aluminio y LASA 55, obtenido por Laines *et al.* (2008); pero igualando el 97% de reducción de turbiedad obtenidos por Amokrane *et al.* (1997), utilizando como coagulantes al cloruro férrico y sulfato de aluminio.

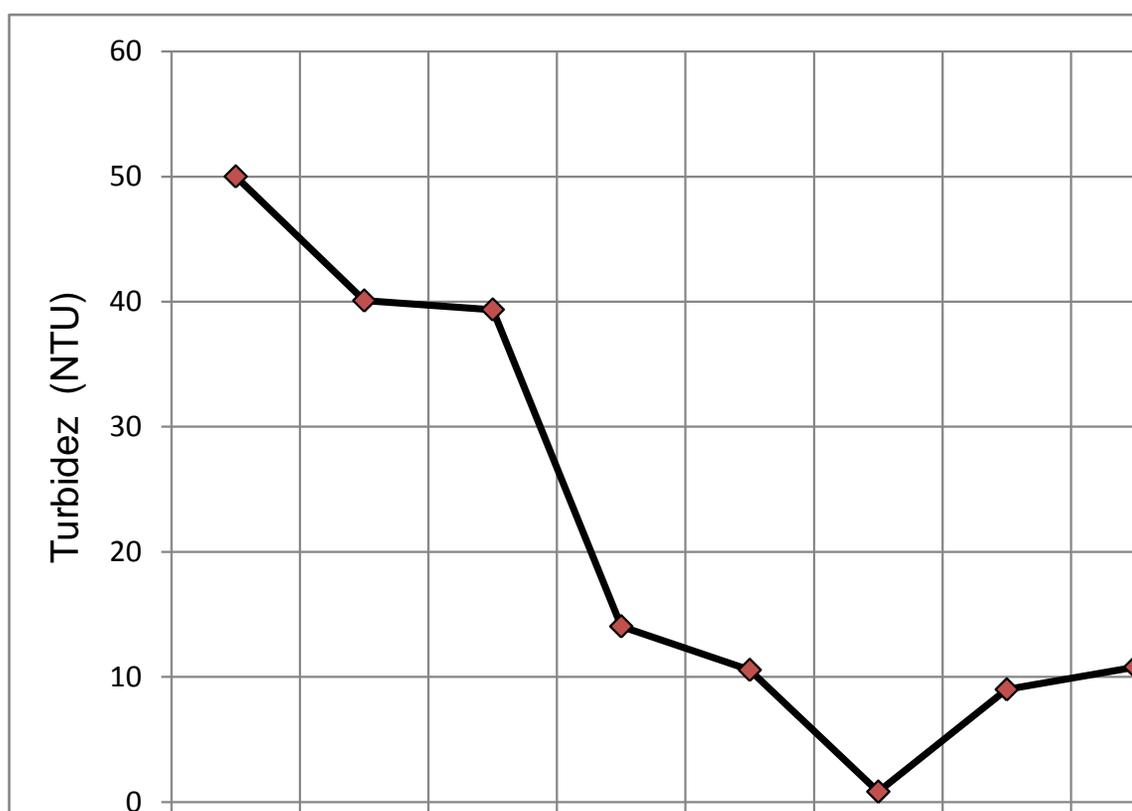


Fig. 2: Comportamiento de la turbidez en el lixiviado con hidroxiclورو de aluminio, como coagulante.

De inicio la concentración óptima de cada una de estas sales constituyó una de las primeras diferencias, ya que para el sulfato de aluminio se requirieron 2,250 ppm mientras que de hidroxiclورو de aluminio solamente se necesitó 1.5 ppm, lo cual se aprecia en la Figura 3.

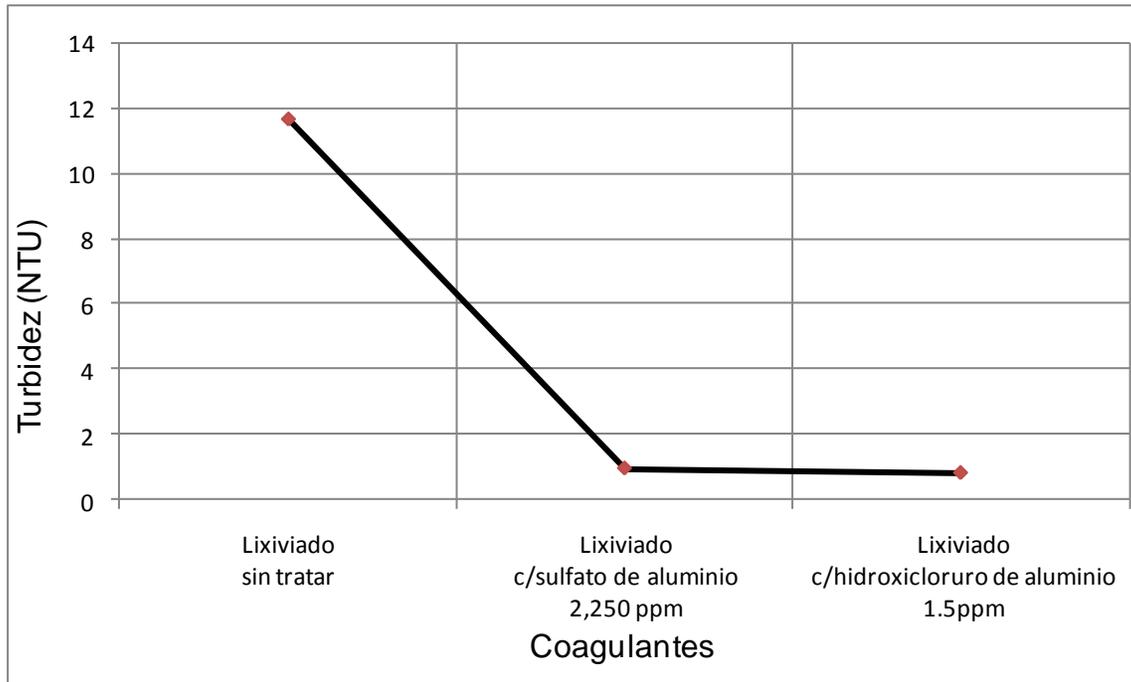


Fig. 3: Comparación del comportamiento de la turbidez en el lixiviado sin tratamiento y después de ser tratado con sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio como coagulantes.

### Reducción de la DQO y SDT

Para evaluar la eficiencia del hidroxiclورو de aluminio sobre la calidad del lixiviado se determinaron varios parámetros cuyos resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Caracterización del lixiviado tratado con la dosis óptima de hidroxiclورو de aluminio.

Concentración óptima $Al_2(OH)_5Cl_2 \cdot 5H_2O$ (ppm)	Oxígeno disuelto (mg/L)	DBO <sub>5</sub>	DQO	Coliformes totales UFC/100mL	Coliformes fecales UFC/100mL
1.5	1.31	134	404	4,500	0

Como se puede observar en el parámetro del oxígeno disuelto hubo una recuperación de 0 a 1.31 mg/L, y con referencia a los otros parámetros determinados hubo disminución en ellos, como en la DQO que inicialmente presenta un valor de 1,482 mg/L a 404 mg/L, lo que refiere a un 72.7% de disminución, la DBO<sub>5</sub> reduce de 494 mg/L a 134 mg/L, que equivale a un 72.8% de lo que presentaba inicialmente (Figura 4). Méndez *et al.* (2002), obtuvo para un tiempo de contacto de 8 horas, remociones de 65% de DQO para lixiviados sin tratamiento, mientras que en los ensayos con reducción de pH, se obtuvieron remociones de 90%, con carbón activado; lo cual es mejorado por el hidroxiclورو de aluminio en cuanto a los lixiviados sin tratamiento. Del mismo modo Laines *et al.* (2008); obtuvo con LASAR 23530 remociones de 11% a dosis de 150 mg/L, con una mezcla completa de 65% material orgánico y 35% sulfato de aluminio; para lo cual dicha investigación es mejor. Pero igualando el 72% de reducción de DQO, obtenido por Ntampou *et al.* (2006), a una concentración de 180 mg/L utilizando 7 mM de hierro más 11 mM de aluminio en el proceso de coagulación-floculación y posteriormente aplicando ozonificación, lo cual incrementa el costo del proceso.

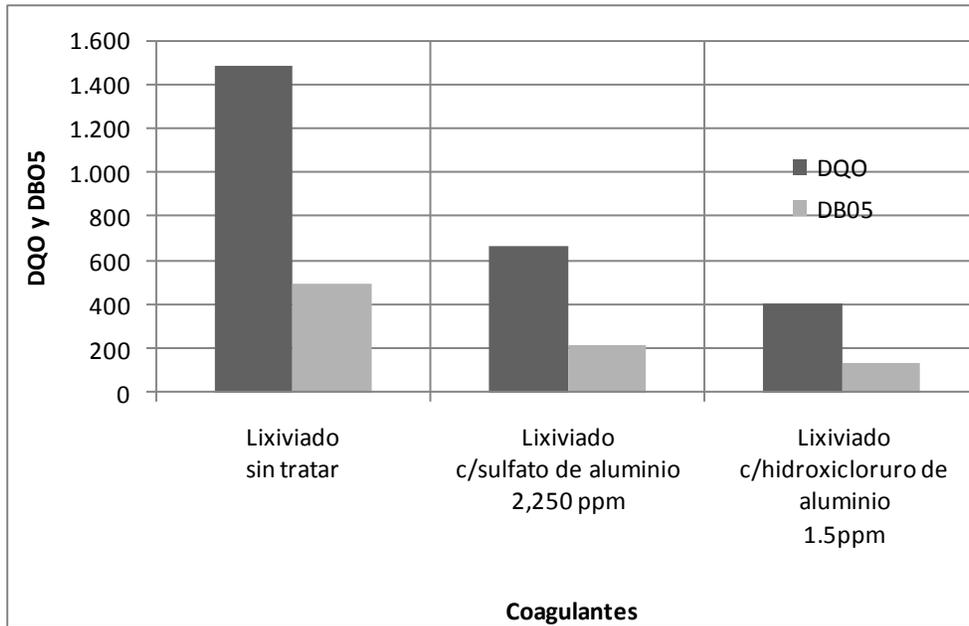


Fig. 4: Comparación del comportamiento de la DQO y la DBO<sub>5</sub> en el lixiviado sin tratamiento y después de ser tratado con sulfato de aluminio e hidroxiclورو de aluminio como coagulantes.

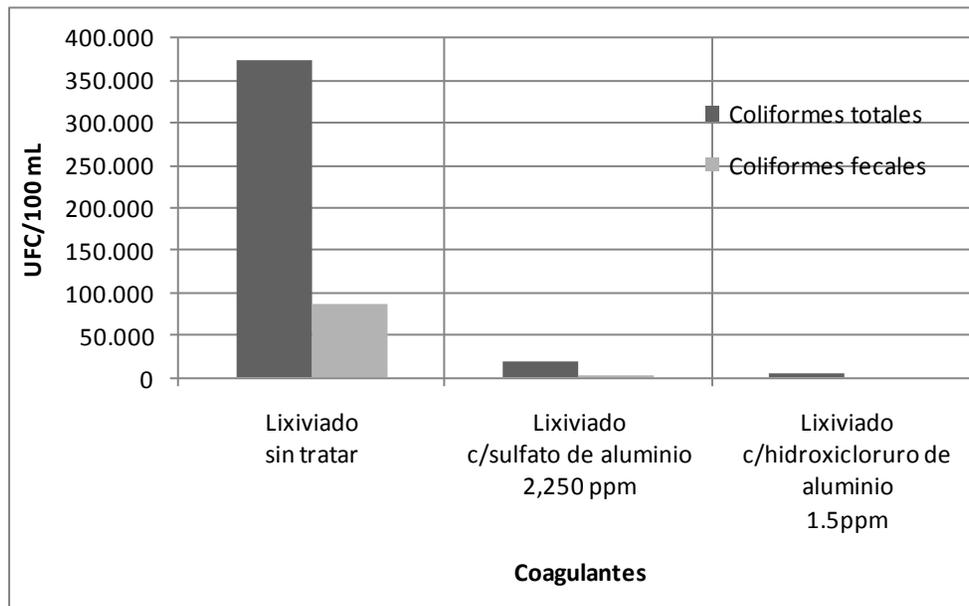


Fig. 5: Comparación del comportamiento de los coliformes totales y fecales en el lixiviado sin tratamiento y después de ser tratado con los coagulantes estudiados.

En lo referente al crecimiento bacteriano, en los coliformes totales disminuyó de 373,000 a 4,500 UFC/100 mL, equivalente a un 98.7% menos y de coliformes fecales de 86,000 a 0 UFC/100 mL (Figura 5).

Sin embargo en los sólidos disueltos totales se presentó un incremento de 2,220 a 2,350 mg/L, que en porcentaje representa un aumento de 5.8% por lo que se infiere que en relación a ello, también se incrementa la solubilidad.

El comportamiento más significativo de los parámetros determinados a este fluido después del proceso de coagulación fueron los coliformes totales y fecales que disminuyeron con el sulfato de aluminio un 95.29%, mientras que con el hidroxiclorigenato de aluminio fue del 98.8%, en tanto que la DQO disminuyó en un 55.34 % con el sulfato de aluminio y un 72.74 % con el hidroxiclorigenato de aluminio.

Tanto los valores de turbidez como el pH presentaron variaciones poco significativas, sin embargo, es importante mencionar que con las dos sales los sólidos disueltos totales se incrementaron en un 3.6% con el sulfato y un 5.8 % con el hidroxiclorigenato.

## CONCLUSIONES

Con las pruebas realizadas y los resultados obtenidos en este estudio, podemos concluir que al llevar a cabo los análisis correspondientes y determinados los parámetros de turbidez, pH, salinidad, conductividad, SDT, OD, DBO<sub>5</sub>, DQO, coliformes totales y coliformes fecales del lixiviado, no todos presentaron la misma eficiencia, debido a que en el caso de la cal (CaO) presenta una muy baja actividad floculante, para el caso del lixiviado se incrementa de 4 a 5 veces su cantidad y su costo. Por lo que no es rentable para implementarlo en el tratamiento primario de estos fluidos.

En el caso de el sulfato de aluminio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>), se pudo observar que su actividad floculante es buena en ambos fluidos, sin embargo se requieren de cantidades elevadas para que logre llegar a su punto óptimo, y esto hace que el tratamiento sea costoso.

Y por último el hidroxiclorigenato de aluminio [Al<sub>2</sub>(OH)<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub>\*5H<sub>2</sub>O] mostró tener una actividad floculante muy buena en ambos fluidos debido a que las cantidades óptimas para su tratamiento son muy bajas, por lo que demuestra ser muy eficaz y, en cuanto respecta al tiempo que requiere para llevar a cabo su función es mucho menor en comparación al que requieren los otros coagulantes lo que lo caracteriza como eficiente y demuestra que es rentable aunque su costo sea elevado.

Finalmente de acuerdo a los datos anteriores, se puede reafirmar que de los tres coagulantes utilizados el que presenta mejor potencial floculante es el hidroxiclorigenato de aluminio, ya que logró remover casi toda la materia presente en el lixiviado, mejorando con ello el tiempo de trabajo y el costo de tratamiento.

## REFERENCIAS

1. Amokrane, A., Comel, C. & Veron, J. (1997). Landfill leachates pre-treatment by a coagulation-flocculation. *Water Res.*, 31, 2775-2782.
2. Arboleda Valencia, J. (2000). Teoría y Práctica de la Purificación del Agua, "Tomo 1", Editorial Mc Graw Hill – Interamericana, 3ra Edición. Bogotá, Colombia.
3. Cartwright, P. (2009). Tratamiento y reuso Del agua en aplicaciones comerciales e industriales. *Agua Latinoamérica*, 9(1), 20-24.

4. Cogollo Flores, J.M. (2011). Clarificación de Aguas usando coagulantes polimerizados: Caso del Hidroxicloruro de Aluminio. *Rev. Dyna*, 78 (165), 18-27.
5. Coulter, R.G. & Mahoney, E.M. (1997). "Selecting optimum technology mixes for landfill leachate treatment", Air & waste Management Association 90, Annual Meeting, Canada.
6. Droppelmann, C.V. & Oettinger, M. (2009). Tratamiento en Lodo Activado del Lixiviado de un Relleno Sanitario. *Información Tecnológica*, 20 (1), 11-19.
7. González, S. & Valdivia, C. (2001). Tratamiento de los lixiviados de un vertedero en un sistema de lodos activados. XXVII Congreso Internamericano. *Eng. Sanit. Amb.*, pp. 1-11.
8. Laines Canepa, J.R., Goñi Arévalo, J.A., Adams Schroeders, R. & Camacho Chiu, W. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario". *Rev. Interciencia*, 33 (1), 22-28.
9. Longsdon, G., Hess, A. & Horsley M. (2002). Guía para la selección de procesos de tratamiento de agua. 1ª Edición Mc Graw-Hill, Madrid, España, pp. 131.
10. Matarán, A., Ramos, A., Moreno, B. & Zamorano, M. (2003). Utilización de filtros inundados en el tratamiento de lixiviados procedentes de vertederos de residuos sólidos urbanos. *Revista Residuos*, 13, 92-99.
11. Méndez, R.I., Medina, E., Quintal, C., Castillo, E.R. & Sauri. M.R. (2002). Tratamiento de lixiviados con carbón activado. *Ingeniería*, 6, 19-27.
12. Méndez Novelo, R.I., García Reyes, R.B., Castillo Borges, E.R. & Sauri Riancho, M.R. (2010), Tratamiento de lixiviados por oxidación Fenton, *Revista Ingeniería e Investigación*, 30 (1), 80-85.
13. Metcalf & Eddy (2003). Ingeniería de Aguas Residuales. Rev. Tchobanglous G., Burton F. L. Mc Graw Hill. México.
14. Monje, I. & Orta, M. (2004). Removal and Transformation of recalcitrant organic matter from stabilized saline landfill leachates by coagulation-ozonation coupling processes. *Water Res.*, 38, 2359-2367.
15. NOM-MX-001 (1996). SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana 001. Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario oficial de la nación*, México.
16. Ntampou, X., Zouboulis, Al. & Samaras, P. (2006). Appropriate combination of physico-chemical methods (coagulation/flocculation and ozonation) for the efficient treatment of landfill leachates. *Chemosphere*, 62, 722-730.
17. Parra, P. (1999). Depuración de lixiviados con oxígeno en vertederos de RSU. *Revista Residuos*, 48, 38-40.
18. Peng, Y., Zhang, S., Zeng, W., Zheng, S., Mino, T. & Satoh, H. (2008). Organic Removal by Denitritation and Methanogenesis and Nitrogen Removal by Nitritation from Landfill Leachate, *Water Research*: 42(4-5), 883 - 892.
19. Rivas, J., Beltrán, F., Carvallo, F., Acevedo, B. & Gimeno, O. (2004). Stabilized leachates: sequential coagulation-flocculation + chemical oxidation process. *J. Haz. Mat.*, 116, 95-102.

20. Robinson, H. & Last, S. (1999). Tecnología punta en el tratamiento de lixiviados en Europa. *Revista Residuos*, 46, 70-73.
21. Tatsi, A.A., Zouboulis, A.I., Matis, K.A. & Samara, P. (2003). Coagulation-flocculation pretreatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, 53, 737-744.
22. Wang, Z., Zhang, Z., Lin, Y., Deng, N., Tao, T. & Zhuo, K. (2002). Landfill leachate treatment by a coagulation-photooxidation process. *J. Haz. Mat.*, 95, 153-159.