

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UNA BATERÍA DE FILTROS EMPACADOS EN ZEOLITA EN LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS PRESENTES EN UN LICOR MIXTO BAJO CONDICIONES DE LABORATORIO

Diana Rocío Acevedo Cifuentes*
Sandra Milena Builes Felizzola**
Carlos Andrés Ordóñez Ante***
Idalia Jacqueline López Sánchez****

Recibido: 04/08/2010

Aceptado: 16/03/2011

RESUMEN

En este artículo se muestran resultados de investigación obtenidos en la remoción de los metales pesados, plomo, níquel, cromo, cadmio y mercurio, presentes en una solución compuesta por licor mixto proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de San Fernando y una solución preparada con metales pesados con una concentración conocida, mediante el uso de una batería de filtros empacados en zeolita clinoptilolita.

La experimentación se desarrolló bajo condiciones controladas de caudal y pH, a temperatura ambiente. Se encontró que la eficiencia de los filtros bajo las condiciones específicas de diseño es significativamente alta en la remoción de los metales pesados evaluados en la solución acuosa. Se encontró, además, que sin importar el valor de la concentración inicial, se obtuvo una remoción importante en los contaminantes luego de pasar por los filtros con una mayor eficiencia en la remoción del mercurio.

Palabras clave: metales pesados, zeolita, filtros, biosólido.

* Ingeniera química, especialista en Ingeniería Ambiental, profesora de cátedra, categoría C2, Facultad de Ingenierías Universidad de Medellín, carrera 87 No 30-65, teléfono 3405452, dracevedo@udem.edu.co fax 3405216

** Estudiante Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín, carrera 87 No 30-65, teléfono 3405452, sandra_felizzola@hotmail.com. fax 3405216

*** Ingeniero geólogo, especialista en Mecánica de Suelos y Cimentaciones, magister en Ingeniería- Geotecnia, profesor asociado Facultad de Ingenierías PCJIC carrera 48 No 7-151, teléfono 3197900 ext. 399, caordonez@elpoli.edu.co, fax 35129660

**** Ingeniera geóloga, magister en Ingeniería Ambiental, profesora asistente Facultad de Ingenierías Universidad de Medellín, carrera 87 No 30-65, teléfono 3405452, ilopez@udem.edu.co, fax 3405216

EVALUATION OF EFFICIENCY OF A FILTER BATTERY PACKAGING ZEOLITE IN THE REMOVAL OF HEAVY METALS IN A MIXED LIQUOR UNDER LABORATORY CONDITIONS

ABSTRACT

This article shows the research results on the removal of five heavy metals (lead, nickel, chromium, cadmium and mercury) present in a liquor made of a mixture of wastewater from San Fernando wastewater treatment plant and a solution prepared with known concentrations of heavy metals, using a series of battery filters packed with zeolita clinoptilolita.

The experiments were run under controlled conditions of flow and pH, at room temperature. It was found that the removal efficiency was significantly high under the specified design conditions; an important removal of the contaminants after passing through the filters, independently of the initial concentration, with the highest observed removal for mercury, was also found.

Key words: heavy metals, zeolites, filters, biosolids.

INTRODUCCIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos bajo condiciones de laboratorio de una fase del proyecto; “Evaluación de la recuperación de un talud degradado empleando biosólidos y técnicas de bioingeniería”, desarrollado conjuntamente por el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y la Universidad de Medellín, relacionados con la determinación de la eficiencia de una batería de filtros empacados en zeolita cliptinolita, en la retención de los metales pesados plomo, níquel, cromo, cadmio y mercurio, presentes en una solución acuosa compuesta por licor mixto y una solución preparada con metales pesados con una concentración conocida. La determinación de la eficiencia de dichos filtros se ha considerado relevante dentro de este estudio por la aplicación que estos pudieran tener en campo, en la filtración de aguas de escorrentía provenientes de taludes degradados tratados con biosólido como enmienda para el establecimiento de vegetación, útil en el control de erosión [1-3].

Se eligió la zeolita clinoptilolita como material filtrante por su alta capacidad de adsorción e intercambio iónico [4-6] y su alta capacidad de adsorción debido a su estructura microporosa en forma de panel de abeja [7, 8], que posibilita la retención de metales pesados presentes en aguas residuales contaminadas, con importantes porcentajes de remoción obtenidos bajo condiciones de laboratorio [6, 9, 10], lo cual es relevante en esta investigación porque probablemente algunos metales pesados presentes en suelos recuperados con los biosólidos [11], luego de ser usados como enmienda orgánica para el establecimiento de vegetación, útil en el control de erosión [12, 13], podrían incorporarse a las aguas de escorrentía y contaminar fuentes hídricas cercanas.

Se hizo un análisis estadístico con los datos obtenidos, mediante cajas y bigotes para los diferentes metales examinados en laboratorio, así como su representación mediante códigos de nivel; esto con el fin de observar la variabilidad de los datos, antes y después de pasar por los filtros.

1 METODOLOGÍA

Con el fin de evaluar la eficiencia de los filtros empacados en zeolita se diseñó un experimento bajo condiciones controladas de laboratorio. Para ello se realizó el montaje de una batería de filtros, compuesta por un primer filtro de flujo descendente, conectado al segundo de flujo ascendente, ambos con un diámetro de 10.5 cm, una altura de 60 cm, y altura de empaque de la zeolita 50 cm. A cada uno de ellos se le adicionó una mezcla en proporción 1:1, primero con zeolita de tamaño 4.75 mm y luego con tamaño 2.36 mm; con esto se buscó aumentar la capacidad de adsorción y retención del material en el filtro, sin que la zeolita fuera arrastrada en el proceso de tratamiento. (Ver figuras 1 y 2).

Se usó licor mixto proveniente de la PTAR San Fernando, tomado en el sector LAR (lodo activado de retorno). En la caracterización de este licor no se tuvieron en cuenta todos los parámetros de calidad de agua, debido a que el interés del proyecto radicaba en evaluar la remoción de los metales pesados de riesgo ambiental, y no otros parámetros fisicoquímicos.

Al licor se le agregó una solución que contenía los metales plomo, níquel, cromo, cadmio y mercurio de forma que las concentraciones de cada uno de los metales en la solución fueran de 3 ppm con



Figura 1. Batería de filtros en laboratorio

Fuente: elaboración propia.

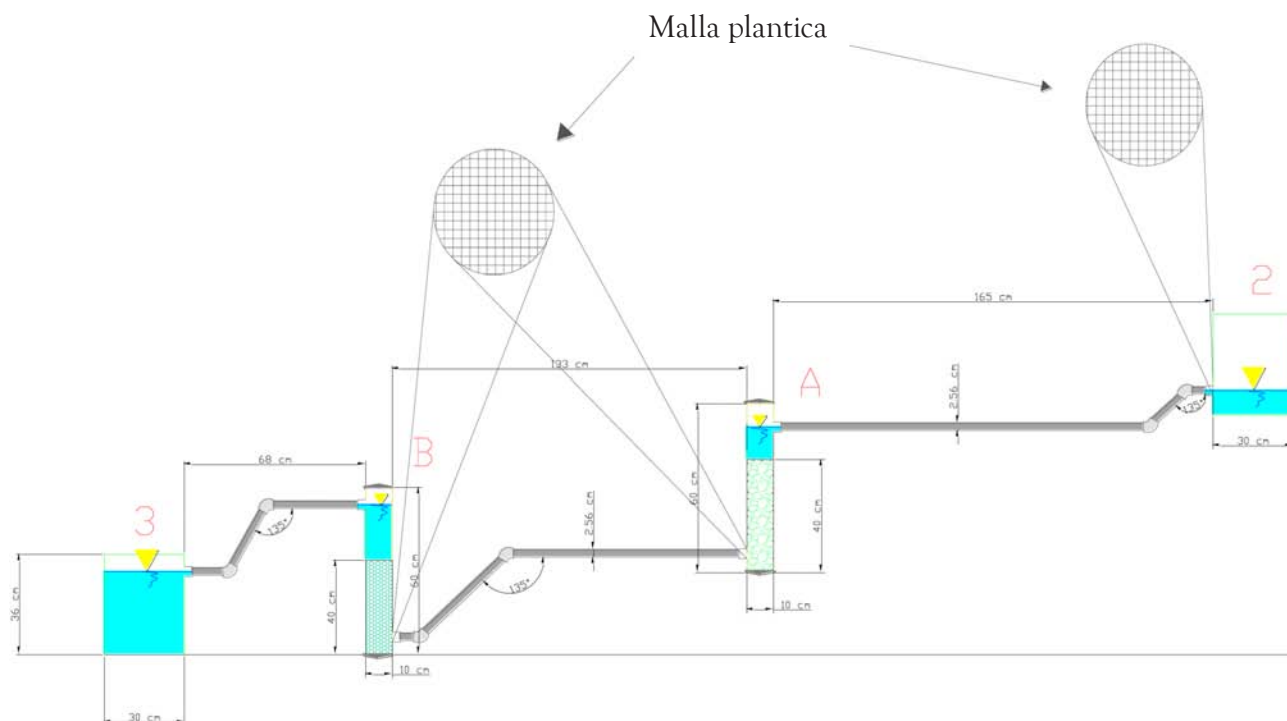


Figura 2. Detalle diseño batería de filtros

Fuente: elaboración propia.

el fin de asegurar la evaluación del porcentaje de remoción de los metales al entrar en contacto con los filtros empacados con zeolita, ya que en los análisis realizados al biosólido y en las aguas de escorrentía evaluadas en campo realizadas en investigaciones anteriores [2], se encontró que los contenidos de metales era bajos y algunos muy cercanos a los límites de detección de la técnica empleada (absorción atómica). La preparación se realizó a partir de una solución inicial que contenía 300 ppm de cada uno de los metales, se tomaron 100 ml de esta solución y se aforaron a 10 litros con licor mixto, que fue el volumen tratado, y al cual se le analizó el contenido final de metales en solución por medio de la técnica de absorción atómica, realizados en el laboratorio GDCON de la Universidad de Antioquia en un equipo GBC 932 Plus.

Esta solución se hizo pasar por la batería de filtros bajo condiciones controladas de caudal cuyos valores estuvieran cercanos a los obtenidos en campo para lo cual se dejó que la zeolita se saturara de la solución acuosa y se estabilizó el

caudal por medio de llaves ubicadas a la entrada y salida de los filtros. El pH de la solución no se modificó para no afectar los microorganismos no patógenos que pudieran estar presentes en el agua, según lo establece el decreto 1594/1984, artículos 38, 39 y 40. (Ver tabla 1). El proceso se realizó a temperatura ambiente.

Se hicieron cinco ensayos, independientes uno del otro, donde se tomaron 3 muestras, una inmedia-

Tabla 1. Condiciones de caudal y pH en los ensayos de remoción

Fecha	Ensayo	Caudal promedio (ml/s)	pH antes del filtro	pH después del filtro
Diciembre 16/08	1	6.7	8.4	7.8
Diciembre 16/08	2	8.0	8.5	8.2
Diciembre 18/08	3	6.0	7.0	8.2
Enero 23/09	4	8.0	6.8	7.4
Enero 30/09	5	8.0	6.9	7.6

Fuente: elaboración propia

tamente de la otra, luego de dejar pasar la solución por los filtros unos 5 minutos, así se garantizó que toda la solución saturara la zeolita. Luego de cada ensayo se desmontaron y lavaron minuciosamente todos los elementos del sistema, se empleó en el desarrollo de cada uno de ellos, la misma zeolita que fue lavada y activada en cada ocasión, con una solución de NaCl al 20% (3.5N) que estaría en el rango de 1N a 4N, trabajado en otras experiencias con buenos resultados [4], y, aunque se puede dejar secando a temperatura ambiente, para acelerar el proceso se secó al horno a 100°C por 2 horas; a esta temperatura no hay riesgo de cambios estructurales de la zeolita [5]. Posteriormente se empacó la zeolita en el sistema y se realizó el ensayo siguiente. Los ensayos terminaban cuando se tomaban las muestras necesarias, no se tomaron más muestras en el tiempo por lo cual no se evaluó el tiempo de colmatación de la zeolita ni la capacidad de intercambio, debido a que el interés era hacer una evaluación puntual como se hizo en campo [2].

Las muestras se tomaron antes y después de pasar por los filtros (ver figura 3), con dos réplicas para los metales, ya que la variabilidad en los resultados obtenidos para metales es muy poca, como se ha reportado en investigaciones anteriores [2].

Los datos obtenidos se evaluaron con base en un diseño; teniendo en cuenta que el tipo de

estudio es experimental, la población de estudio está representada por los metales pesados presentes en la solución acuosa, la unidad de análisis fue la concentración de los metales pesados y se estudió como variable la concentración de cada uno de los metales en la solución, en mg/l. Este tipo de variable es dependiente y cuantitativa.

Las características del proceso de recolección de datos garantizan la independencia en los ensayos, dado que en cada uno de estos, los filtros se encontraban lavados y esterilizados, antes de cada uno de los ensayos.

Bajo estas condiciones y con el objetivo de determinar la eficiencia del filtro se consideró utilizar un diseño de muestras pareadas, que permita establecer el hecho de que existe una diferencia significativa entre la concentración de metales antes de pasar por los filtros y después de hacerlo. Las condiciones de dependencia entre el antes y el después quedan establecidas en la descripción del experimento, dado que la solución que se evalúa a la entrada de los filtros es la misma que se evalúa a la salida.

El análisis de muestras pareadas se llevó a cabo para cada uno de los metales en estudio y posteriormente se hizo la comparación de la eficiencia del filtro entre los diferentes metales evaluados.



ANTES



DESPUÉS

Figura 3. Muestras de agua antes y después de filtrar

Fuente: elaboración propia

2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Eficiencia de los filtros en la remoción de metales bajo condiciones de laboratorio

Las concentraciones de metales encontradas en la solución con licor mixto antes de pasar por los filtros sufrieron variaciones respecto al cálculo realizado para que éstas estuvieran cercanas a 3 ppm. Se observan en todos los casos valores menores a los calculados; esto debido a la presencia de fosfatos, carbonatos y sulfatos que se encuentran presentes en aguas residuales [14] que al entrar en contacto con los metales reaccionan con ellos formando sustancias insolubles [14] que se precipitan y, además, son arrastrados con los sólidos sedimentables que conformaban los lodos del licor mixto. A continuación se presentan los resultados relacionados con las remociones obtenidas para cada de los metales en evaluación.

2.1.1 Remoción del plomo

En la figura 4 se observa una remoción importante en los cinco ensayos realizados. Se obtuvieron mayores remociones en los ensayos 2, 3, 4 y 5, y menor en 1. Esta diferencia podría deberse a que en el ensayo 1, la concentración inicial de plomo en el licor mixto fue baja. En los otros ensayos las remociones fueron mayores, mostrando la eficiencia de la zeolita para el plomo en presencia de otros metales, como lo reporta [15], donde se presentan



Figura 4. Eficiencia de la batería de filtros en la remoción del plomo

Fuente: elaboración propia

varias experiencias con diferentes tipos de zeolita incluyendo la clinoptilolita en el tratamiento de aguas contaminadas por efluentes mineros.

Se observa, en esta misma figura, que las concentraciones de la solución luego de pasar por la batería de filtros, en los ensayos 2 al 5 son mayores a 0,1 mg/l, superando la norma referenciada en la tabla 2.

En el ensayo 1, aunque se tuvo una concentración inicial muy baja, el porcentaje de remoción es aceptable, y las concentraciones iniciales y finales estuvieron por debajo de la referencia.

2.1.2 Remoción de níquel

En la figura 5, se muestran notables reducciones en las concentraciones en los cinco ensayos. Como

Tabla 2. Valores de referencia para vertimientos líquidos, concentraciones en biosólidos y límites de detección

Metal	Concentración máxima permisible en aguas (mg/l)	Concentración máxima para biosólidos norma CRF 40 503 EPA mg/kg b.s.	Límite de detección (mg/l)
Plomo	0.1	840	0.005
Níquel	0.2	420	0.01
Cromo total	1.0	3000	0.01
Cadmio	0.003	85	0.002
Mercurio	0.02	57	0.001

Fuente: elaboración propia

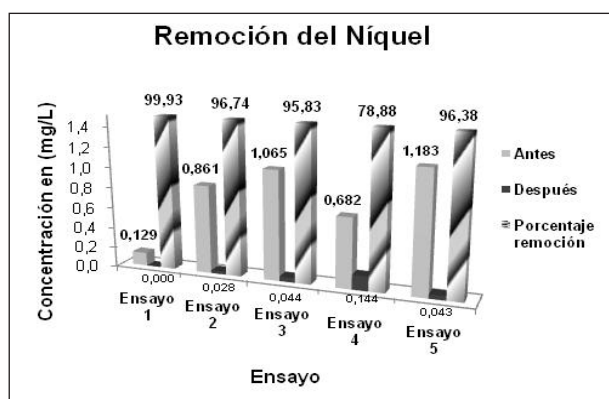


Figura 5. Eficiencia de la batería de filtros en la remoción del níquel

Fuente: elaboración propia

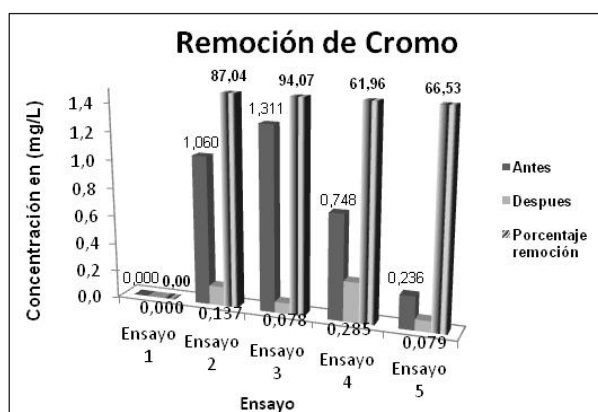


Figura 6. Eficiencia de la batería de filtros en la remoción del cromo

Fuente: elaboración propia

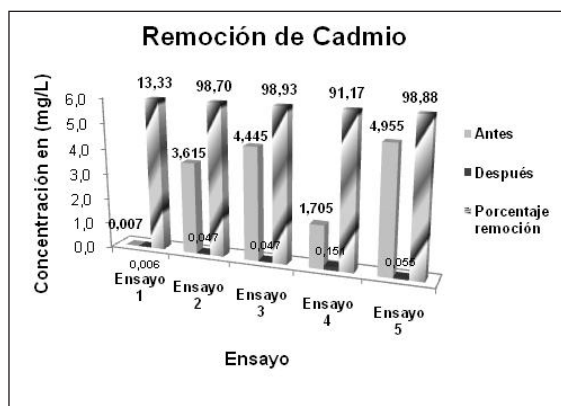


Figura 7. Eficiencia de la batería de filtros en la remoción del cadmio

Fuente: elaboración propia

puede observarse, los porcentajes de remoción fueron altos para los ensayos 1, 2, 3 y 5, puesto que estuvieron por encima del 95%. El porcentaje más bajo corresponde al 78,9%; aunque la remoción fue menor, representa una buena eficiencia. En los ensayos 2 al 5 las concentraciones obtenidas después de pasar por los filtros estuvieron por debajo de la norma. Para el ensayo 1, el valor inicial fue 0.129 mg/l, el cual es inferior a la norma; luego de pasar por los filtros, fue de 0.0001 mg/l, lo cual muestra la eficiencia del filtro aún con concentraciones muy bajas.

2.1.3 Remoción del cromo

En la figura 6 se observa que se obtuvo remoción del cromo en todos los ensayos, pero con resultados variables. Los porcentajes de remoción en los ensayos 2 y 3 son mayores, y las concentraciones obtenidas después del filtro están por debajo de la norma, aunque al inicio tenían concentraciones por encima de la misma.

Los ensayos 4 y 5 presentaban concentraciones inferiores al valor de referencia antes de pasar por los filtros y aún así se obtuvieron remociones considerables.

2.1.4 Remoción de cadmio

Como puede observarse en la figura 7, en el primer ensayo la concentración ya es muy baja antes de pasar por el filtro, incluso es cercana al límite de detección del equipo de absorción atómica, aún así se observa que se obtuvo remoción del 13.3%.

En los ensayos 2 al 5, las concentraciones iniciales estuvieron por encima de la referencia; aún así se muestra una notable disminución en las concentraciones de cadmio luego de pasar por los filtros, aunque estuvieron por encima de 0.003 mg/l, valor de referencia. Los porcentajes de remoción de estos ensayos estuvieron por encima del 91%, lo que indica una buena eficiencia de la zeolita en la remoción de este metal.

2.1.5 Remoción de mercurio

En la figura 8, se muestra una evidente remoción en todos los ensayos realizados. Los porcentajes de remoción fueron superiores al 99%, lo cual es satisfactorio y muestra una gran eficiencia de los filtros empacados con zeolita en la remoción de este metal.

Las concentraciones iniciales están por encima del valor de la referencia ambiental, el cual es de 0.02 mg/l; las concentraciones finales estuvieron por debajo de dicha norma y por debajo del límite de detección, y mostraron la mejor remoción comparativamente con los otros metales evaluados.

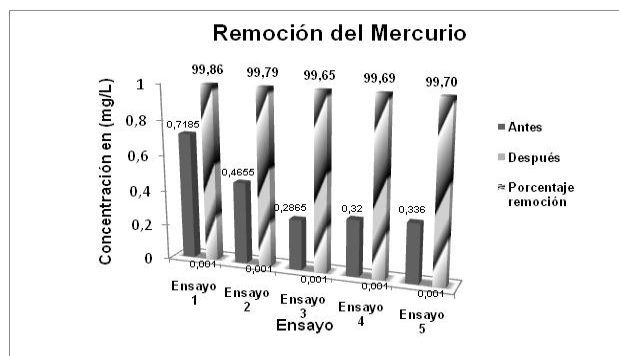


Figura 8. Eficiencia de la batería de filtros en la remoción del mercurio

Fuente: elaboración propia

2.2 Análisis estadístico

Se pretende con este análisis determinar la eficiencia de los filtros empacados en zeolita en el proceso de retención de metales presentes en la solución acuosa en evaluación.

2.2.1 Eficiencia de los filtros en la remoción de metales

En la figura 9 se puede observar en todos los gráficos que la concentración de cada metal en la solución acuosa disminuye significativamente después de pasar por el filtro. Observe en los diferentes gráficos que la diferencia de la variabilidad entre el antes y el después es aparentemente significativa para todos los metales, ya que la variabilidad de los datos disminuye después de que la solución ha pasado por el filtro. Observando el cromo, se tiene un valor extremo después de pasar por el filtro, y pese a ello muestra una disminución en la concentración del metal en la solución. De otro lado, en el mercurio se observa que después de pasar por el filtro, la concentración se reduce significativamente. Esto evidencia la eficiencia del filtro para el mercurio.

En la tabla 3 se presentan los promedios de la concentración de cada metal antes y después

Tabla 3. Resumen estadístico para los metales

Metal	Filtro	N° de Datos	Promedio	Varianza	Desviación estándar
Cadmio	Antes	10	2,9454	4,44346	2,10795
	Después	10	0,0613	0,00265912	0,0515667
Niquel	Antes	10	0,7841	0,179318	0,42346
	Después	10	0,052	0,00273111	0,05226
Mercurio	Antes	10	0,4253	0,0524129	0,228939
	Después	10	0,001	0,0	0,0
Plomo	Antes	10	3,0541	4,49871	2,12102
	Después	10	0,2698	0,0385997	0,196468
Cromo	Antes	10	0,6728	0,291474	0,539884
	Después	10	0,1815	0,0474741	0,217885

Fuente: elaboración propia

de pasar por el filtro; se puede observar de dicho promedio que la concentración de cada metal después de pasar por el filtro es alrededor de 100 veces menor que a la entrada del mismo. Es importante resaltar que estos valores promedio varían de un mínimo de 3.7 veces para el cromo hasta 425.3 veces para el mercurio, metal en el que se encontró la mejor eficiencia en la remoción.

Nótese en esta tabla que los valores de la desviación estándar antes y después establecen una variabilidad menor para la muestra después de pasar por filtro que la variabilidad antes de pasar por el mismo. En los gráficos de cajas y bigotes y en la representación por códigos de nivel (ver figura 9) se evidencia dicha variabilidad.

En la tabla 4 se encuentra el resumen estadístico para la diferencia de concentración de los metales; se observa un valor promedio de 2,8841 mg/l para el cadmio y una variabilidad de 2,10854. Es importante notar la similitud de estos datos con los hallados en la tabla 3 para la concentración del cadmio antes de pasar por el filtro, lo que establece una concentración muy pequeña del metal a la salida del filtro, evidenciado una alta remoción del mismo.

En general se puede observar en la tabla 4 que el comportamiento promedio de las diferencias de concentraciones de los metales en el antes y el después es muy similar al hallado en la concentración promedio del metal antes de pasar por el filtro; esto es, la eficiencia del filtro observada para el cadmio se presenta en todos los metales.

Con base en lo planteado, se presenta la siguiente hipótesis referente a la variable determinada por la diferencia de la concentración del metal en el licor mixto antes y después de pasar por el filtro.

H_0 : La diferencia promedio de las muestras es igual a cero.

H_1 : La diferencia promedio de las muestras es diferente de cero.

Como ya se mencionó, el diseño experimental se ha clasificado como de muestras pareadas; bajo

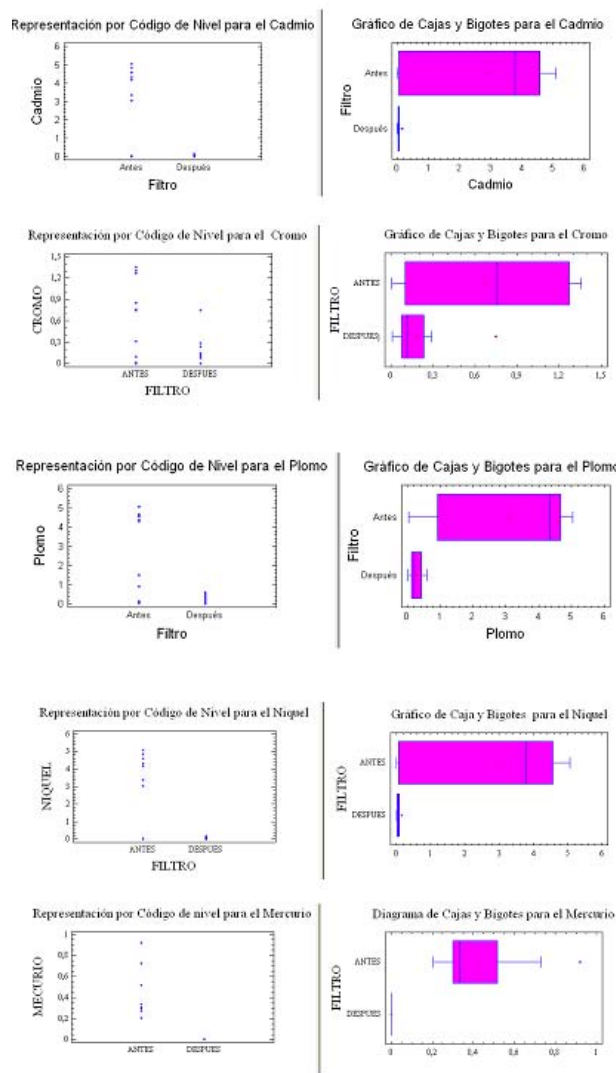


Figura 9. Representación gráfica de los datos para los metales evaluados bajo condiciones de laboratorio

Fuente: elaboración propia

estas condiciones se encontraron los estadísticos y el valor P para cada una de las diferencias en los cinco metales evaluados, para un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$; los resultados se muestran en la tabla 5. Como puede observarse, el valor P está por debajo del nivel de significancia (0.05) para todos los metales, lo que significa que se rechaza la hipótesis nula; esto es, la diferencia promedio, para todos los metales evaluados, es diferente de

Tabla 4. Resumen estadístico para las diferencias en los diferentes metales (antes – después del filtro.)

	<i>Cadmio</i>	<i>Plomo</i>	<i>Níquel</i>	<i>Mercurio</i>	<i>Cromo</i>
Frecuencia	10	10	10	10	10
Media	2,8841	2,7843	0,7321	0,4243	0,4913
Varianza	4,44595	4,22134	0,177317	0,0524129	0,352732
Desviación típica	2,10854	2,05459	0,42109	0,228939	0,593912
Mínimo	-0,104	-0,029	0,104	0,202	-0,434
Máximo	5,009	4,885	1,282	0,919	1,233
Rango	5,113	4,914	1,178	0,717	1,667
Asimetría típica	-0,93658	-0,64907	-0,195772	1,93004	-0,018906
Curtosis tipificada	-0,91192	-1,30298	-0,707832	0,891164	-0,855651

Fuente: elaboración propia

Tabla 5 Estadístico de muestras pareadas para los metales

	<i>Cadmio</i>	<i>Plomo</i>	<i>Níquel</i>	<i>Mercurio</i>	<i>Cromo</i>
Estadístico t	4,32542	4,2854	4,32542	5,86076	2,61592
Pvalor	0,00191791	0,00203377	0,00191791	0,000240514	0,027998

Fuente: elaboración propia

cero, lo que garantiza una remoción eficiente para todos los metales después de pasar por el filtro. Por tanto, la hipótesis nula se rechaza aun para el cromo, el cual presentaba un valor atípico en el análisis descriptivo que se hizo al comienzo.

3. CONCLUSIONES

Se encontró que la eficiencia de los filtros empacados con zeolita clinoptilolita, bajo las condiciones específicas con las que se construyeron las baterías de filtros, es significativamente alta en la remoción de metales pesados, evaluados en la solución acuosa compuesta por licor mixto de la PTAR San Fernando y una solución de metales pesados preparada en laboratorio con una concentración similar a las encontradas en los lixiviados de biosólidos.

Con base en el análisis estadístico se encontró que la concentración de metales presente en la salida del filtro empacado en zeolita no es directamente proporcional a la concentración en la entrada. Es decir, sin importar el valor de la concentración antes de pasar por el filtro se observó una remoción

importante en los contaminantes evaluados, luego de pasar por los mismos.

Los filtros empacados en zeolita fueron eficientes en la remoción del cromo, pese a la presencia de valores extremos en la concentración del mismo después de pasar por el filtro.

REFERENCIAS

- [1] C. A. Ordóñez *et al.*, "Protección de taludes por medio de aplicación de biosólidos provenientes de P.T.A.R.," en *Memorias del VI Congreso Suramericano de Mecánica de Rocas y XI Congreso Colombiano de Geotecnia*, UNAL, ed., Bogotá: UNAL, 2006. pp. 291-301.
- [2] I. J. López *et al.*, "Metales presentes en biosólidos empleados como enmienda en un talud recuperado con bioingeniería," en *Memorias sexto encuentro nacional e internacional de investigaciones*, PCJIC, ed., Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, 2008. pp. 205-219.
- [3] I. J. López *et al.*, *Evaluación de la recuperación de un talud degradado empleando biosólido y técnicas de bioingeniería*, Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Universidad de Medellín, 2011, 112 p.

- [4] T. Pavón *et al.*, "Evaluación del efecto de la temperatura en la remoción de cadmio, cobre, hierro, níquel, plomo y zinc del agua utilizando zeolita natural tipo clinoptilolita," Universidad Nacional Autónoma de México, 2009, p. 7.
- [5] M. Olgúin, "Zeolitas características y propiedades," Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Depto. de Química, 2006, p. 21.
- [6] M. J. Zamzow *et al.*, "Removal of heavy metals and other cations from wastewater using zeolitas," *Separation Science and Technology*, vol. 25, no. 13, pp. 1555-1569, 1990.
- [7] M. Mengel, "Zeolitas de criba molecular," *Revista de Ingeniería Química*, vol. 17, no. 195, pp. 133-140, 1985.
- [8] O. L. Corona, y M. A. Hernández, "Propiedades de adsorción en zeolitas con anillos de 8 miembros. Microporosidad y superficie externa," *Revista Materia*, vol. 14, no. 3, pp. 918-931, 2009.
- [9] E. Alvarez-Ayuso *et al.*, "Purification of Metal Electroplating Waste Waters using Zeolites," *Water Research*, vol. 37, pp. 4855-4862, 2003.
- [10] D. R. Acevedo, "Síntesis, caracterización y evaluación de zeolitas naturales y sintéticas como adsorbentes," *Revista Contaminación Ambiental*, vol. 14, no. 26, pp. 19-25, 1993.
- [11] J. A. Vélez Zuluaga, "Destino de metales pesados en un suelo tratado con biosólidos provenientes de la planta de tratamiento de aguas San Fernando," Tesis de Maestría, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, 2006.
- [12] J. C. Castro, "Estudio preliminar de aplicación de biosólidos en suelos para control de erosión y estabilización de taludes," Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, 2005.
- [13] G. Daguer, "Gestión de biosólidos en Colombia," presentado a Congreso nacional de ACODAL, sociedad, ambiente y futuro, Cali, 2003.
- [14] T. L. Brown *et al.*, *Química: la ciencia central*, 7 ed., México: Prentice Hall, 1998, 991 p.
- [15] A. Curi *et al.*, "Las Zeolitas y su Aplicación en la descontaminación de efluentes Mineros," *Información Tecnológica*, vol. 17, no. 6, pp. 111-118, 2006.