

ESTUDIOS PRELIMINARES DE LA BIOMASA SECA DE EICHHORNIA CRASSIPES COMO ADSORBENTE DE PLOMO Y CROMO EN AGUAS

PRELIMINARY STUDIES OF EICHHORNIA CRASSIPES DRY BIOMASS FOR LEAD AND CHROMIUM REMOVAL FROM WATERS

Elizabeth Atehortua*, Carmiña Gartner

Grupo de Ciencia de los Materiales, Universidad de Antioquia. Sede de Investigación
Universitaria, SIU. Calle 62 No. 52-59, Torre 1 Laboratorio 310. Teléfono: 057-4-2198599

*Autor de correspondencia: eliathe@yahoo.es

RESUMEN

La *Eichhornia crassipes* también conocida como jacinto acuático o buchón de agua, es una planta común en las fuentes de agua potable. Debido a su reproducción desmedida ha llegado a causar serios problemas en embalses y ríos porque genera eutroficación afectando la supervivencia de otras especies acuáticas y la navegación. Sin embargo se ha encontrado que esta planta puede ser también benéfica pues se ha utilizado en procesos de fitorremediación por su carácter altamente hidrofílico que la convierte en un buen adsorbente. Además su biomasa seca puede utilizarse en productos artesanales o para la generación de biocombustibles. En esta investigación se estudia la planta seca y triturada como material adsorbente de metales pesados en aguas residuales, específicamente de plomo y cromo. Se encontró que este material es un adsorbente eficaz de metales pesados dado que pudo adsorber plomo y cromo de soluciones. Se concluye que la biomasa de la *E. crassipes* puede ser usada eficientemente como material adsorbente para descontaminación de aguas residuales.

Palabras claves: *Eichhornia crassipes*, materiales adsorbentes, plomo

ABSTRACT

Eichhornia crassipes, also known as water hyacinth, is a common aquatic plant in water basins. It is often considered as highly problematic invasive species due to its uncontrolled proliferation, which causes eutrophication, threaten of other aquatic species and navigation problems. Nevertheless, it has been found that this plant can also be beneficial, being used in processes as phytoremediation, due to its hydrophilicity which makes a good adsorbent. Its dry biomass can also be used for artisan products or for biocombustibles. In this research we used the grinded and dry biomass from the plant as an adsorbent for Pb and Cr in waste water. It was found that this material is a highly efficient adsorbent. It is concluded that dry *E. crassipes* could be efficiently used for waste water decontamination.

Key words: *Eichhornia crassipes*, adsorbent materials, lead

1. INTRODUCCIÓN

Eichhornia crassipes es una planta macrófita de la familia de las monocotiledóneas. Es conocida como Lirio Acuático, Jacinto de Agua ó Buchón de Agua. Está constituida por un tejido de polisacáridos estructurales como celulosa y hemicelulosa, además de lignina, un polímero aromático, heterogéneo e insoluble en ácidos [1,2]. *E. crassipes* es considerada una maleza acuática que aparece en lagunas, ríos y embalses en todo el mundo. Su capacidad de invasión afecta los ecosistemas acuáticos debido a su alto ritmo de multiplicación. Su ocupación de la superficie impide el paso de la luz solar y del oxígeno, afectando la supervivencia de otros seres, causando mortandad de especies acuáticas y promoviendo el crecimiento de microorganismos patógenos vectores de enfermedades. Además pueden taponar en poco tiempo una vía fluvial, afectando la navegación y la pesca. Actualmente, se utilizan métodos mecánicos para contener su crecimiento, con equipos que la recolectan y luego la desechan en las orillas. En otros casos de infestación severa, son necesarias técnicas de amplia cobertura basadas en el control químico con herbicidas [2-5].

Sin embargo, la *E. crassipes* debido a su capacidad de biorretención, ha sido empleada en sistemas de purificación biológica o fitorremediación para mejorar la calidad del agua [5]. Es por ello que la planta debe ser aprovechada cuando se hace presente en los embalses y debe ser controlada con el fin de aprovechar su acción benéfica como descontaminante del agua. Se ha encontrado que estas plantas han sido aplicadas como filtros biológicos para remover impurezas en aguas contaminadas basándose en el proceso de biosorción. Se utilizan especialmente para remover metales pesados, sólidos suspendidos y colorantes, convirtiéndolas en una buena alternativa desde el punto de vista ecológico y económico para la descontaminación de aguas residuales [6-9].

Además de la fitorremediación, se han buscado otras alternativas que permitan controlar su infestación como estrategia para evitar el uso de herbicidas. Una de estas alternativas consiste en usar los residuos de biomasa, aprovechando las fibras de esta planta como materia prima en la elaboración de productos artesanales. Los materiales obtenidos posibilitan el crecimiento de una actividad económica alternativa, generando un impacto ambiental positivo. Entre los productos más comunes se ha encontrado el papel y variedad de tejidos artesanales, pues la fibra del tallo es bastante resistente; además también se fabrican con ella aglomerados semejantes a la madera. Otra posibilidad importante es su uso como fuente de energía en la producción de biogas o a partir de su propia combustión [4-10].

Otro tipo de fibras de celulosa como el lino y el cáñamo también se han usado para la limpieza de suelos contaminados por metales pesados, principalmente para la extracción de Cadmio, Plomo y Cobre. Igualmente, la fibra de banano es utilizada como esponja por sus propiedades absorbentes para limpiar derrames de petróleo [11,12]. Ortiz *et al.* [13] evaluaron la capacidad de sorción de líquidos por fibras de coco y caña de azúcar, analizando que esta capacidad depende de variables como la granulometría y estructura del material. En el estudio de Torres *et al.* [14] se analizó la capacidad de sorción de la *E. crassipes* seca por medio de ensayos de flujo y encontraron que esta capacidad depende de variables como la velocidad de flujo, el pH de la solución y el tamaño de partículas.

El presente estudio tiene como objetivo demostrar la capacidad de la planta *E. crassipes* para adsorber metales pesados en aguas, utilizando su biomasa seca para la remoción de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales contaminadas. Se ofrece así una alternativa simple y económica para resolver dos problemas ambientales: uno el de la infestación de los embalses por esta planta, y el otro, la descontaminación de aguas por metales pesados a partir de la biomasa seca y triturada. La mayoría de los estudios con la *E. crassipes* se basan en fitorremediación, y en el presente trabajo se propone el uso de la planta como biomasa seca para comprobar su eficiencia en la remoción de metales en solución, lo cual abre la posibilidad de usar materiales lignocelulósicos que son desechados, en la descontaminación de aguas.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Obtención del material: Se cosecharon los tallos de *Eichhornia crassipes* en la represa Porce II (Antioquia). Para ello se seleccionaron plantas en los sitios de mayor concentración. Se recolectaron las plantas de mayor volumen a simple vista y luego se efectuó un proceso de drenado estático mediante secado al aire libre (temperatura ambiente) durante 48 horas. Después se secaron a 80°C durante 2 horas en estufa, realizando un molido posterior mediante un molino de cuchillas. El material se tamizó en malla 80 obteniéndose partículas con tamaños variables entre 0,18 a 0,84 mm. Este tamaño fue reportado como óptimo para la adsorción por Torres *et al.* [14].

2.2. Caracterización del material:

Contenido de humedad: Se analizó el contenido de humedad de la muestra triturada mediante un analizador termogravimétrico (TGA), TA Instruments Q100, calentando a 10°C/min hasta 110°C, y dejando en isoterma a esta temperatura por 60 min, en atmósfera de nitrógeno. También se realizó una prueba de absorción de humedad del tallo midiendo la diferencia de peso antes y después de sumergirlo en agua hasta su saturación. La densidad relativa del material molido, se determinó por el método de desplazamiento de volumen, bajo la norma ASTM D-792I.

Composición química: Se determinaron los elementos que componen el material usando la técnica de fluorescencia de rayos X con un equipo Thermoscientific. ARL Optim'x WDRF. Por espectroscopía infrarroja se obtuvo el espectro del material molido, mediante la técnica de attenuated total reflectance (ATR), usando un equipo Perkin Elmer Spectrum One, bajo las siguientes condiciones: 32 barridos y resolución de 2 cm⁻¹.

Comportamiento térmico: Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido DSC, TA instruments Q1000 usando una rampa de 10°C/min desde -80 hasta 120°C, previo borrado de la historia térmica del material, con el fin de determinar las transiciones de primero y segundo orden. Además se determinó la capacidad calorífica usando un calentamiento modulado usando una rampa de 3°C/min y una amplitud de modulación de 0,5°C. Por análisis termogravimétrico se cuantificaron los diferentes componentes de la muestra mediante calentamiento en atmósfera oxidativa a 10°C/min, desde temperatura ambiente hasta 800°C.

Análisis de la morfología y estructura: Se realizó a las secciones transversales y longitudinales de los tallos enteros, por microscopía óptica (Advanced 40x) y al material triturado, por microscopía electrónica de barrido SEM, usando un equipo marca JEOL JSM 6490, previa aspersión con oro del material seco. El área superficial y porosidad se determinaron en un equipo Micromeritics ASAP 2020 analizando las isotermas de adsorción de N₂ mediante la ecuación BET (Brunauer-Emmett-Teller) usando el intervalo de linealidad dado por los valores de presión relativa (P/P₀) de 0.05 a 0.3. Las muestras se sometieron a un tratamiento previo de desgasificación en bajo vacío por 4 horas a 70°C.

2.3. Evaluación de la capacidad adsorbente del material triturado

El material seco y tamizado se suspendió en soluciones de plomo mediante agitación mecánica a 50 rpm durante 15, 30 y 45 minutos. La cantidad de material adsorbente por litro de solución fue de 0.4, 1 y 2 g. Para el material sin tratamiento térmico se hicieron también medidas a 5 y 10 minutos usando 2 g de material por litro de solución de plomo. Después de transcurrido cada tiempo, se separó el material adsorbente por filtración con el fin de determinar el contenido de metales en el líquido sobrenadante por absorción atómica; el sólido filtrado se secó a 70°C durante 4 h para ser analizado por fluorescencia de rayos X.

Se usaron dos tipos de soluciones de metales pesados para medir la capacidad adsorbente. Una de las soluciones consistió en una solución estándar de 22,62 ppm de acetato de plomo Pb (C₂H₃O₂)₂.3H₂O grado analítico, usada con el fin de estandarizar el método. La otra solución correspondió a un lixiviado proveniente de un vertedero de basura (Moravia), con un contenido de 1,190 ppm de Pb y 0,1158 ppm de Cr. Para la cuantificación del plomo en la solución por medio del ensayo de absorción atómica, se utilizó un equipo Perkin Elmer 2380, bajo la norma SM 3111B.

Tratamiento de modificación superficial: Se realizó una modificación superficial del material molido por medio de un tratamiento térmico a 200°C durante 6 horas con el fin de comparar la capacidad de adsorción de metales, la cual fue evaluada del mismo modo antes descrito.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Los tallos de las plantas obtenidos después del muestreo en la represa se muestran en la figura 1. Se observa su estructura esponjosa y bulbosa, lo cual es una característica que le permite flotar a la planta.



Figura 1. Tallos de *Eichhornia crassipes*.

La superficie inflada está conformada por cámaras o celdas dando lugar a una estructura porosa, la cual le sirve a la planta para acumular agua y aire en su interior. Las imágenes obtenidas por SEM del material triturado se muestran en la figura 2. En ellas se observa claramente la estructura macroporosa del material.

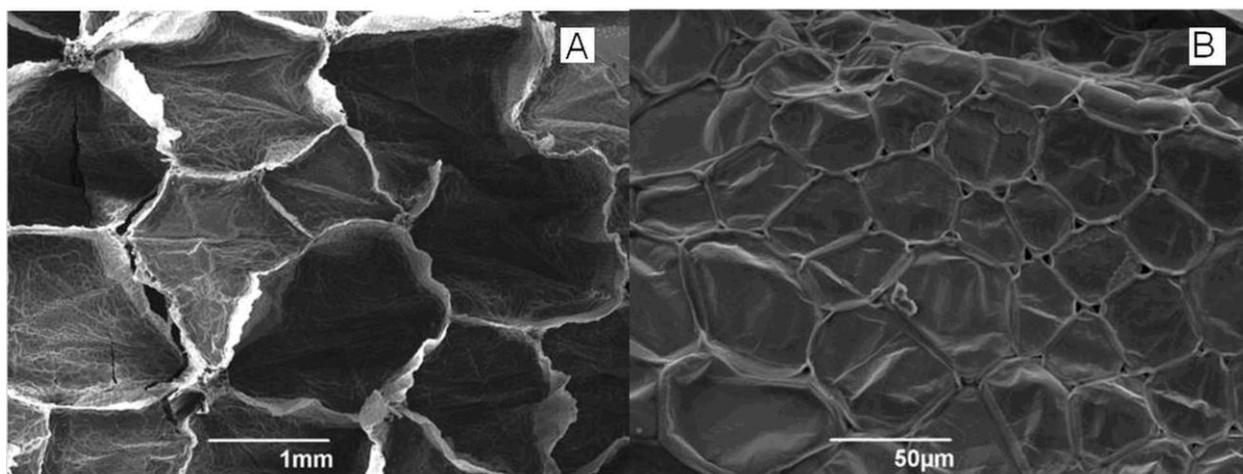


Figura 2. Micrografías SEM del material triturado, corte transversal: A) 1 mm B) 50 μm

Propiedades físicas

Se encontró que los tallos de la planta contienen una humedad superior al 90%; este resultado se aproxima a lo reportado por Harun *et al.* [15], quienes encontraron que la planta contiene alrededor del 95% de humedad. Además de su estructura esponjosa, la otra causa de la alta retención de agua es la presencia de los grupos hidroxilo en su estructura los cuales posibilitan la formación de enlaces de hidrógeno. Por su parte el material triturado y seco contiene un promedio de 5.9% de humedad, como se encontró por termogravimetría.

La medida de la densidad arrojó un valor de 0.0665 g/mL. Se debe tener presente que la densidad determinada por el método utilizado es aproximada para los materiales muy porosos, pues al no expulsarse todo el aire de los poros, quedan burbujas adheridas a la superficie produciendo un empuje.

Con el fin de determinar la presencia de meso y microporosidad, se realizó un análisis por BET. Se encontró que el material presenta una baja área superficial, dando un valor de 1,4128 m²/g. No se presenta ninguna microporosidad. Se presentan algunos poros con cavidades mayores de 12,3 nm en el rango de la mesoporosidad, pero el material es básicamente macroporoso, como puede corroborarse de las micrografías SEM (ver figura 2).

Comportamiento térmico

La figura 3 corresponde a la descomposición térmica del material triturado. Se observan tres pérdidas significativas: La primera hasta 260°C donde ocurre la pérdida de agua y volátiles; aquí pierde el 10 % de su peso. La segunda entre 260° y 400°C, en la cual se descompone la hemicelulosa y el material pierde el 50% de su peso. La tercera por encima de 400°C incluye la descomposición de la celulosa y lignina restante y se pierde el 27 % del peso, dejando un residuo de 13%. Esta descomposición coincide con lo encontrado por Huber y Dale [7].

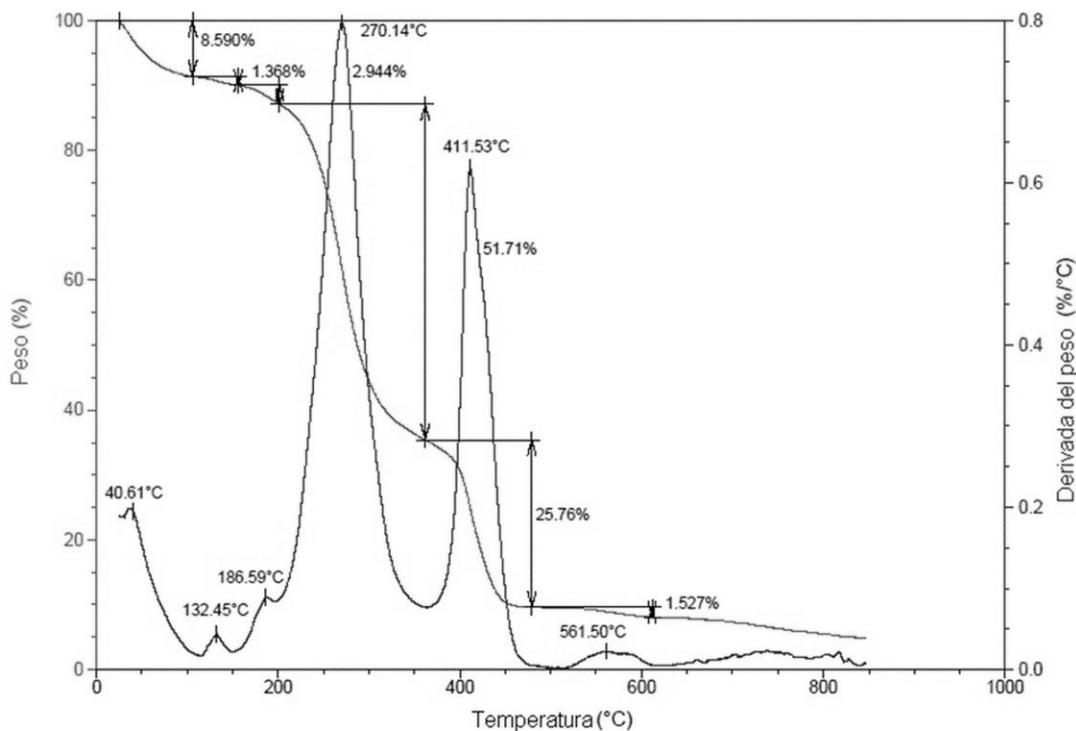


Figura 3. Termograma de la planta *E. crassipes* seca y triturada.

Por calorimetría diferencial de barrido no se observa ninguna transición de primer o segundo orden. Se observa sin embargo un pequeño cambio en la línea base alrededor de 95°C que

podiera ser asignada a una transición vítrea. Para corroborar si este pequeño cambio corresponde a una transición, se realizó un DSC con temperatura modulada y a partir de este resultado se concluyó que no es un fenómeno reversible y por lo tanto no puede asociarse a una transición vítrea. La leve curvatura encontrada corresponde a la eliminación de agua y no a un cambio estructural; por lo tanto se concluye que este material no presenta transiciones de fase en el rango de temperatura estudiado.

A partir de este análisis por DSC modulado se determinó la capacidad calorífica del material. Se encontró un incremento de la capacidad calorífica (C_p) de este material, que varía linealmente desde 2.79 J/ g °C hasta 4.67 J/ g °C. Su variación en el rango de temperatura estudiado ($-80 < T < 120^\circ\text{C}$), puede definirse mediante la siguiente función:

$$C_p = 0,102 T + 3,3471$$

Composición química

Los resultados del análisis por fluorescencia de rayos X del material molido presentaron una gran variedad de elementos, siendo los más abundantes el potasio (12%), calcio (5%), cloro (2.5%), manganeso (0.5%) y aluminio (0.5%); asimismo se encontraron contenidos más bajos de Ti, Sr, Sn, Br, Mo, Zn y Ni. Los elementos encontrados son requeridos por la planta como nutrientes en su metabolismo. El principal mecanismo por el cual la planta puede acumular *in vivo* los metales es a través de reacciones de complejación con los aminoácidos [6]. No se observó la presencia de metales como el Pb y el Cr.

Su estructura química pudo visualizarse mediante análisis infrarrojo. En la figura 4 se puede observar el espectro FTIR obtenido para el material deshidratado. En este espectro se observan los grupos característicos de la celulosa, hemicelulosa y lignina como estiramientos de C=O en 1643 cm^{-1} , estiramientos de C-O en 1602 cm^{-1} , estiramientos de C-O-C de enlaces glicosídicos β -(1-4) de la celulosa, estiramiento C-O en 1064 y 1030 cm^{-1} . Además los estiramientos de los grupos OH entre 3000 y 3750 cm^{-1} , corresponden a los OH de las moléculas ligno-celulósicas, además de las moléculas de agua enlazada [16].

Medida de la adsorción de plomo

Las medidas de adsorción de plomo se realizaron por suspensión del material en solución a diferentes tiempos, usando tres cantidades de material adsorbente, cuantificándose el plomo residual en la solución sobrenadante para cada tiempo de agitación y cantidad de material, como fue explicado anteriormente.

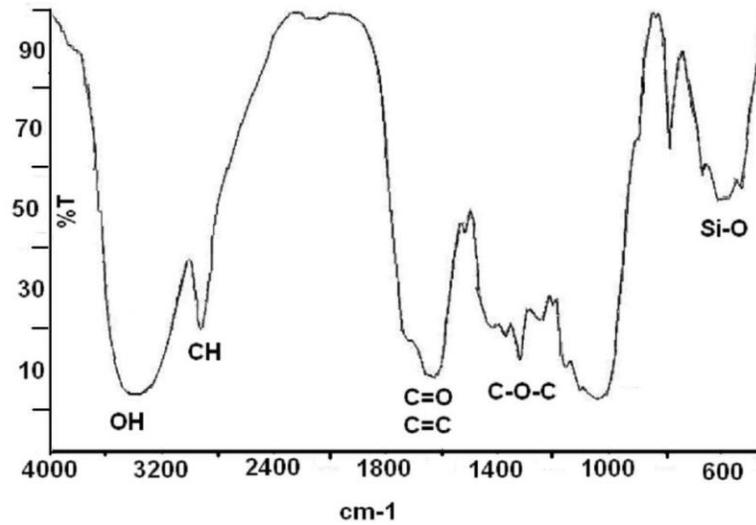


Figura 4. Espectro infrarrojo del material seco

Resultados de la adsorción del material en solución de acetato de plomo

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos de la cuantificación de Pb por absorción atómica, para las soluciones obtenidas después del proceso de adsorción. Cada proceso fue realizado a partir de una solución inicial de acetato de plomo.

Tabla 1. Resultados de la adsorción de plomo del material sin tratar

Peso de material adsorbente (g) por litro de solución	Tiempo de agitación (min)	Concentración de Pb (ppm)	Desviación estándar	Pb adsorbido (%)
0,0	---	22,62	0,04	---
	15	7,82	0,01	65,4
0,4	30	7,47	0,02	67,0
	45	6,70	0,03	70,4
	15	4,97	0,02	78,0
1,0	30	4,65	0,004	79,4
	45	4,32	0,01	80,9
	5	4,56	0,001	79,8
	10	3,52	0,003	84,4
2,0	15	3,10	0,004	86,5
	30	3,10	0,004	86,5
	45	3,10	0,03	86,5

Los resultados obtenidos revelan la alta capacidad de adsorción de plomo del material. La concentración de Pb en la solución disminuye con el aumento en la cantidad de material adsorbente, como es de esperarse, arrojando el mejor resultado (mayor remoción de plomo) cuando se usó la mayor cantidad de material: 2 g en 1 L de solución. Por otra parte, la concentración de plomo disminuye con el tiempo de agitación. Se observa que el material presenta una etapa muy rápida de adsorción (15 min) y después de este tiempo no aumenta significativamente la cantidad de plomo adsorbida. No se usó una cantidad mayor de 2 g de material debido a la dificultad de suspenderlo en la solución por tener muy baja densidad. Para esta cantidad de material adsorbente se encuentra que después de 15 minutos el material no adsorbe más plomo con el incremento del tiempo de adsorción. Y aunque estadísticamente no pudo ser demostrado, puesto que el grupo muy pequeño impidió un análisis de varianza significativo, puede concluirse *a priori* que 15 minutos es el tiempo de adsorción máximo usando 2 g de material adsorbente por litro de solución.

Esta alta capacidad de adsorción se debe en primera instancia a la presencia de grupos hidroxilo en las moléculas de celulosa, además de los OH del agua enlazada, los cuales posibilitan la formación de puentes de hidrógeno. El proceso se ve además favorecido por la estructura porosa del material. Se concluye que este material es un buen adsorbente para el plomo.

Con el fin de observar si el tratamiento de modificación superficial cambiaba la capacidad de adsorción, se realizó el mismo proceso para el material tratado a 200°C por 6 horas. Los resultados de la cuantificación de Pb se consignan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la adsorción de plomo para el material tratado

Peso de material adsorbente modificado (g) por litro de solución	Tiempo de agitación (min)	Concentración de Pb (ppm)	Desviación estándar	Pb adsorbido (%)
0,0	---	22,62	0,04	---
	15	7,88	0,003	65,30
0,4	30	8,58	0,02	62,06
	45	7,79	0,04	65,56
	15	6,93	0,004	69,35
1,0	30	6,74	0,03	70,20
	45	5,76	0,01	74,53
	15	5,39	0,002	76,16
2,0	30	4,11	0,01	81,83
	45	3,60	0,01	84,08

En general, para todas las condiciones, la concentración de Pb disminuye al tratarla con el material adsorbente, sin embargo la capacidad de adsorción con este material modificado es ligeramente menor que para el material sin modificar, como se deduce de los menores porcentajes

de remoción de plomo. El tratamiento de modificación térmica eliminó parte del agua enlazada, al calentar el material a 200°C, disminuyendo así las probabilidades de interacción entre el ión metálico y la superficie del adsorbente, volviéndola más hidrofóbica. Se concluye que el tratamiento térmico realizado no mejoró la capacidad de adsorción del material.

Adsorción en lixiviado (aguas residuales)

El proceso de extracción se repitió para las aguas provenientes de un lixiviado del relleno sanitario de Moravia, usando 2 g de material adsorbente por litro de solución. El material adsorbente que fue retenido en el filtro después de la adsorción se cuantificó por fluorescencia de rayos X. Se observó que el material adsorbió Pb y Cr puesto que estos metales no estaban presentes en la muestra antes del proceso de adsorción, como se resume en la tabla 3.

Tabla 3. Cantidades adsorbidas de Pb y Cr en el material sin tratar

Elemento	% Peso		
	15 min	30 min	45 min
Pb	0,038	0,058	0,058
Cr	0,015	0,027	0,021

Se observa que a los 15 minutos el material adsorbió un gran porcentaje de los metales disueltos y que esta retención aumentó ligeramente con el tiempo de adsorción. De otro lado con el análisis por absorción atómica de las soluciones filtradas, no se detectaron estos dos metales Pb y Cr, por lo cual se deduce que estos fueron retenidos por el material adsorbente. La concentración de Pb y Cr detectada en la solución y el límite máximo permisible estipulado se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Concentración de Pb y Cr detectada en la solución

Elemento	Concentración en el lixiviado (ppm)	Concentración después de la extracción (ppm)	Límite de detección (ppm)	Limite máx. permisible en agua potable (ppm)
Pb	1.190	No se detectó	0,015	0,01
Cr	0.116	No se detectó	0,003	0,05

Estos resultados indican que el material adsorbente removió todo el Pb y Cr de la muestra de lixiviado; además cualitativamente se pudo apreciar una disminución en la turbidez del agua después del proceso de adsorción. Estos resultados preliminares indican que la *E. crassipes* seca y molida constituye un buen material adsorbente de metales pesados en aguas.

CONCLUSIONES

Se encontró que la planta *E. crassipes* seca y molida, por ser un material de constitución lignocelulósica y por consiguiente altamente hidrofílica, es muy efectiva como adsorbente de Pb y Cr en solución, de una forma rápida y sin requerir una infraestructura complicada para su uso. La *E. crassipes* puede ser utilizada como adsorbente de metales pesados en aguas residuales, no sólo en procesos de fitorremediación, sino también aprovechando su biomasa seca. Esta es una alternativa viable y económica para la descontaminación de aguas residuales. Se concluyó que como material adsorbente, la planta no requiere de tratamientos ulteriores además del molido fino, puesto que el material tratado a 200°C no mostró un incremento en la adsorción de plomo.

Una cuestión que debe resolverse es la disposición final de la planta molida cuando ya ha adsorbido los metales. Se propone la incineración como una alternativa, pues los metales de las cenizas pueden permanecer estables y además puede aprovecharse la energía proveniente de su combustión.

La presencia de este tipo de plantas en humedales implica una función depurativa, por lo cual puede traer muchos beneficios siempre y cuando se controle su proliferación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Antioquia por la financiación de esta investigación por medio del proyecto CODI- PR12-1-01 de trabajos de grado.

REFERENCIAS

1. F.O. Agunbiade, B.I. Olu-Owolabi, K.O. Adebowl. "Phytoremediation potential of *Eichhornia crassipes* in metal-contaminated coastal water". *Bioresource Technol.* Vol. 100. pp 4521-4526, 2009
2. J. A. Arteaga, W. Cuéllar, D.R. Ramirez, S. Ríos, S. Giraldo. "Manejo de plantas acuáticas invasoras en embalses de EPM. Caso: Buchón de agua (*Eichhornia crassipes*) en el embalse Porce II, Antioquia-Colombia." *Revista EPM.* N°. 3. pp 22-35. 2010
3. R.P. Keller, D.M. Lodge. "Invasive Species". *Encyclopedia of Inland Waters.* Academic Press. pp 92-99. 2009
4. V. Olvera "Biología y ecología del lirio acuático." Seminario-taller Control y aprovechamiento del Lirio acuático. Ponencia 2. *Instituto Mexicano de tecnología del agua. Secretaria de agricultura y recursos hidráulicos.* México D. F. pp 11-39. 1988.
5. A. Malik. "Environmental challenge vis a vis opportunity: The case of water hyacinth." *Environment International.* Vol. 33. pp 122-138. 2007
6. F.E. Chigbo, R.W. Smith, F.L. Shore. "Uptake of arsenic, cadmium, lead and mercury from polluted waters by the water hyacinth *Eichhornia crassipes*." *Environ. Pollut. A,* Vol. 27. pp 31-36. 1982
7. G. Huber, B. Dale. "Biocarburantes celulósicos" *Investigación y Ciencia: Edición española de Scientific America.* No. 396. pp 44-51. 2009

8. H. Wang, H. Zhang, G. Cai. "An Application of Phytoremediation to River Pollution Remediation". *Procedia Environ. Sci.* Vol. 10. pp 1904–1907. 2011
9. S. Tripathi, B.D. Tripathi. "Efficiency of combined process of ozone and bio-filtration in the treatment of secondary effluent." *Bioresource Technol.* Vol. 102. pp 6850-6856. 2011
10. M.A. Rahman, H. Hasegawa. "Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes." *Chemosphere.* Vol. 83. pp 633-646. 2011
11. J. Ariza, P. Gañan. "Materiales compuestos a partir de biopolímeros y fibras vegetales, una alternativa natural." *Universidad Científica.* Vol. 04. pp 47-55. 2004
12. L.O. González, L. Quinteros. "Uso de Fibras de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto." *Ingeniería y Desarrollo.* N° 20. pp 134-150. 2006
13. D.P. Ortiz, F. Andrade, G. Rodríguez, L.C. Montenegro. "Biomateriales sorbentes para la limpieza de derrames de hidrocarburos en suelos y cuerpos de agua." *Revista Ingeniería e Investigación.* Vol. 26. pp 20-27. 2006
14. S. M. Torres. "Estudio del aprovechamiento del lechuguin, *Eichhornia crassipes*, del embalse de la represa Daniel Palacios como biosorbente de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales." Tesis para la obtención del título de ingeniería ambiental. *Universidad Politécnica Salesiana*, México. 2009.
15. M.Y. Harun, A.B. Dayang, Z. Zainal, R.Yunus. "Effect of physical pretreatment on dilute acid hydrolysis of water hyacinth. (*Eichhornia crassipes*)." *Bioresource Technol.* Vol. 102. pp 5193-5199. 2011
16. W. Zhou, D. Zhu, A. Langdon, L. Li, S. Liao, L. Tan. "The structure characterization of cellulose xanthogenate derived from the straw of *Eichhornia crassipes*". *Bioresource Technol.* Vol. 100. pp 5366-5369. 2009