

DISEÑO DE UN BIOFILTRO PARA REDUCIR EL ÍNDICE DE CONTAMINACIÓN POR CROMO GENERADO EN LAS INDUSTRIAS DEL CURTIDO DE CUEROS

DESIGN OF A BIOFILTER TO REDUCE THE CONTAMINATION CONTENT BY CHROMIUM GENERATED IN THE INDUSTRIES OF THE LEATHER TANNING

OSCAR FABIÁN HIGUERA COBOS

Profesor Asistente, Universidad Tecnológica de Pereira, osfahico@utp.edu.co

JUAN FELIPE ARROYAVE LONDOÑO

Profesor Auxiliar, Universidad Tecnológica de Pereira, jfa@utp.edu.co

LUIS CARLOS FLOREZ GARCIA

Profesor Asistente, Universidad Tecnológica de Pereira, luiscar@utp.edu.co

Recibido para revisar julio 22 de 2008, aceptado septiembre 30 de 2008, versión final octubre 10 de 2008

RESUMEN: El sector industrial de las curtiembres genera descargas con volúmenes altos de concentrados de cromo. El cromo es usado en esta industria como agente de curtido. La dificultad que presenta el uso de sales de cromo en el curtido de pieles, se debe a la gran cantidad de curtiente que no se fija y finalmente se descarga al ambiente, en las aguas residuales causando efectos negativos en el ambiente y a la salud humana. El objeto de este trabajo es proveer una alternativa para la remoción de cromo de aguas residuales de curtiembre utilizando la biomasa de hoja de café variedad castillo, *coffea arabica*.

PALABRAS CLAVE: Cromo, *coffea arabica*, Biosorción, biofiltro.

ABSTRACT: The industrial sector of the tanneries generates unloadings with high volumes of chromium concentrates. The chromium is used in this industry like tanning agent. The tanning of skins presents some difficulties with the use of chromium salts, must to the great amount of tanning agent that does not fix to the skin and finally unloading to the environment, in waste waters causing negative effects in the environment and to the human health. The object of this work is to provide an alternative for the Chromium removal of waste water from tannery using *coffea leaf variety castle, coffea Arabica*

KEYWORDS: Chromium, *coffea arabica*, Biosorption, biofilter.

1. INTRODUCCIÓN

El sector industrial de las curtiembres genera descargas con volúmenes altos de concentrados de cromo. El cromo es usado en esta industria como agente de curtido. El problema que presenta el uso de sales de cromo en el curtido de pieles, es generado por gran cantidad de curtiente que no se fija y finalmente se descarga

al ambiente en las aguas residuales, causando efectos negativos en el ambiente y a la salud humana. [1] Las tecnologías normalmente usadas para tratar éste tipo de descargas, satisfacen en términos generales la eliminación del cromo y otros metales pesados de las aguas pero producen sistemáticamente residuos sólidos (lodos) que contienen compuestos tóxicos cuya disposición final es difícil para la industria y

causan costos elevados relacionados con su almacenaje. Por lo anterior es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que ayuden a mejorar el control ambiental de los efluentes de curtiembres, capaces de extraer los metales contaminantes presentes y poder reutilizarlos en los procesos industriales. [2, 3].

Estudios previos han demostrado que la utilización de materiales biológicos como medios de biosorción, son una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados. Dentro de los biosorbentes usados se encuentran: hongos, bacterias y algas con los cuales se ha conseguido remover metales como uranio, cadmio, cobre, zinc, níquel, cobalto, hierro, plomo y cromo. [3,4]. El objeto de este trabajo es proveer una alternativa para la remoción de cromo de aguas residuales de curtiembre utilizando un material biológico como la biomasa de hoja de café variedad castillo, *coffee arabica*.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Si un fluido con un contenido constante de un componente a eliminar (adsorbato) alimenta a un adsorbente de lecho sólido, dicho fluido se adsorbe inicialmente en la zona inferior del lecho sólido (adsorbente). El fluido que sale del adsorbente no contiene, por lo tanto, adsorbato durante ese periodo. Según transcurre el tiempo, disminuye la capacidad de adsorción en la zona inferior del lecho sólido. El adsorbato se va ligando al adsorbente en zonas cada vez más altas. Esto equivale a la migración de la zona de transferencia de materia (Mass Transfer Zone, MTZ) con el tiempo. Una vez la MTZ alcanza la zona más alta del lecho sólido, se produce la saturación del lecho (ruptura). La concentración del adsorbato en la salida del adsorbente equivale entonces a la concentración en la entrada. [5 6, 7]

El perfil de concentración al principio, en el tiempo t_1 , se muestra en la Figura 1. La concentración del fluido c_0 es la de la alimentación y c es la concentración del fluido en un punto del lecho [7,8]. Después de cierto tiempo, el sólido a la entrada de la torre se encuentra saturado, y la mayor parte de la transferencia de masa y de adsorción sucede

ahora en un punto ligeramente más cercana a la entrada. En un tiempo posterior t_2 , el perfil o la zona de transferencia de masa donde ocurre la mayoría del cambio de la concentración, se ha desplazado más lejos dentro del lecho.

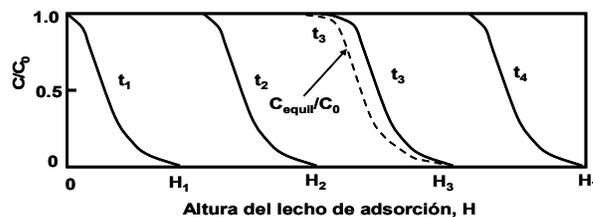


Figura 1. Perfiles de concentración para adsorción en biomasa [7]

Figure 1. Profiles of concentration for biomass adsorption [7]

Los perfiles de concentración que se muestran corresponden a la fase fluida. Los perfiles de concentración para las concentraciones de adsorbato en el sólido son similares. En la entrada, el sólido está casi saturado y su concentración permanece constante hasta la zona de transferencia de masa, donde desciende rápidamente hasta casi cero. La línea punteada correspondiente al tiempo t_3 muestra la concentración en la fase fluida en el equilibrio con el sólido y la diferencia de las concentraciones es la fuerza que impulsa la transferencia de masa [7, 8].

2.1 Concentración de la Curva de Avance

Como se ve en la Figura 1, la mayor parte de la adsorción ocurre en cualquier momento en una zona relativamente angosta de adsorción o de transferencia de masa. Mientras la solución continua fluyendo, esta zona de transferencia de masa, que tiene forma de S, va bajando por la columna. En un tiempo dado t_3 en la Figura 1, cuando casi la mitad del lecho está saturada de soluto, la concentración de salida sigue siendo aproximadamente cero, como se observa en la Figura 2. Esta concentración de salida sigue siendo casi cero hasta que la zona de transferencia de masa empieza a llegar a la salida de la torre en el tiempo t_4 . Entonces la concentración de salida empieza a elevarse, y en t_5 llega a c_b , que se llama punto de ruptura [7, 8].

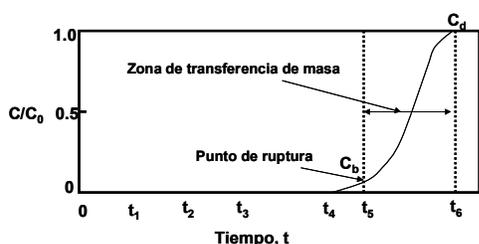


Figura 2. Curva de saturación teórica de la biomasa [7]

Figure 2. Theoretical saturation curve of the biomass [7]

Después de que alcanza el punto de ruptura, la concentración c se eleva muy rápidamente hasta el punto c_d , que es el final de la curva de avance donde el lecho pierde su efectividad. La concentración del punto de ruptura representa el máximo que se puede descartar y se suele tomar como 0.01 hasta 0.05 para c_b/c_0 . El valor c_d/c_0 se toma como el punto donde c_d es aproximadamente igual a c_0 [7].

En una zona angosta de transferencia de masa, la curva de avance es muy marcada y la mayor parte de la capacidad del lecho se ha usado en el punto de ruptura. Esto permite un uso eficiente del adsorbente y disminuye el costo de energía para la regeneración [5, 7]. Si la velocidad de transferencia de masa fuera infinitamente rápida y no hubiera dispersión axial, el ancho de la zona de transferencia de masa sería igual a cero y la curva de avance sería una recta vertical de $c/c_0 = 0$ a $c/c_0 = 1$ [5, 7].

2.2 Variables para el Diseño de un Filtro Tipo Columna

Generalmente se piensa que los filtros son como un tamiz o microcriba que atrapa el material suspendido entre los granos del medio filtrante. Sin embargo la acción de colar, cribar o tamizar el agua es la menos importante en el proceso de filtración, puesto que la mayoría de las partículas suspendidas pueden pasar fácilmente a través de los espacios existentes entre los granos del medio filtrante [9].

Las variables principales en el diseño de filtros planteados por Tchobanoglous [9] son: Características del medio filtrante, porosidad, del lecho, profundidad del lecho, tasa de filtración, pérdida de la carga disponible y características

del afluente. La filtración depende de una combinación compleja de mecanismos físicos y químicos, tales como cribado, sedimentación, intercepción, adhesión, adsorción química, adsorción física y crecimiento biológico. [9].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de esta investigación, se caracterizaron fisicoquímicamente muestras de aguas residuales de curtiembre, los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización físico-química agua residual de curtiembre

Table 1. Physical chemistry characterization waste water of tannery

ENSAYO	RESULTADO	UNIDADES
DBO	10288	mg O ₂ /L
DBO ₅	3978	mg O ₂ /L
Grasas y/o aceites	13645.7	mg/L
Sólidos Totales	970	mg/L
Cromo Total	79.91	mg/L
Cromo (VI)	<0.1	µg/L
Calcio	73.86	mg/L
Magnesio	35.27	mg/L
Sodio	583.33	mg/L
Manganeso	0.45	mg/L
ρ (densidad)	1125.38	kg/m ³
ϕ (viscosidad cinemática)	1.31E-6	m ² /s
μ (viscosidad dinámica)	1.4742E-3	N-s/m ²
γ (peso específico)	11.04	kN/m ³

3.1 Material

Para este estudio se utilizaron reactivos grado analítico para la preparación de las soluciones sintéticas de Cr(VI) y soluciones reales de curtiembre. Se emplearon como materiales biosorbentes hojas de café de distintas variedades (variedad caturra, variedad castillo y arábigo). Con el fin de evaluar los distintos tipos de filtros y determinar cual es el más eficiente, se evaluaron diferentes tipos de arena (arena para acuarios, arena de cuarzo y arena para filtros de piscina), también se empleó antracita de diferente tamaño de partícula.

3.1.1 Evaluación del material adsorbente

A las hojas de café de distintas variedades (variedad caturra, variedad castillo y arábigo) se

les hizo pasar una solución de cromo hexavalente sobre cada una de ellas. La eficiencia de adsorción se situó entre 70% y 90% para las 3 hojas, la hoja de café, *coffea arábica* variedad castillo presentó mayores eficiencias, por lo tanto éste fue el material adsorbente que se utilizó en las pruebas de laboratorio para el diseño del filtro tipo columna.

Las hojas de café se secaron y se trituraron para diferentes tamaños de partícula con el fin de evaluar su efecto sobre la eficiencia de adsorción. Se seleccionó para este estudio un tamaño de partícula de 0,212 mm (Malla #70) ya que esta presentó las eficiencias mas elevadas, porque a menor tamaño de partícula mayor área de contacto existente entre el fluido y la biomasa [3, 4].

3.1.2 Determinación del tiempo de saturación de la biomasa

A una muestra triturada seca de hoja de café variedad castillo (*coffee arabica*); se le agregó un volumen de solución sintética de cromo, el sistema se mantuvo en contacto por un tiempo de 6 horas, para permitir el desarrollo del proceso de adsorción; se tomaron muestras periódicas cada 10 minutos con el fin de evaluar la eficiencia del proceso y determinar el tiempo de saturación de la biomasa.

3.1.3 Selección de la arena para el filtro

Para el análisis de la eficiencia de la arena se asumieron alturas de lechos (biomasa y arena) de 17 mm., y un volumen (30 ml) de solución de cromo hexavalente (1000 ppm), las condiciones de operación se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de las arenas analizadas para el diseño del filtro tipo columna

Table 2. Characteristics of sands analyzed for the design of the filter type column

ARENA	TIPO	MALLA (No.)	DIÁMETRO DE PARTÍCULA	
			µm	in
A	Arena para filtros de acuarios (color café)	30	600	0.0234
B	Arena de Cuarzo	30	600	0.0234
C	Arena para filtros de piscina	20	850	0.0331

3.2 Determinación de los Componentes del Filtro

Se adaptaron los sistemas utilizados para el filtrado de afluentes en el filtrado de efluentes, estos sistemas son representados en la Figura 3.

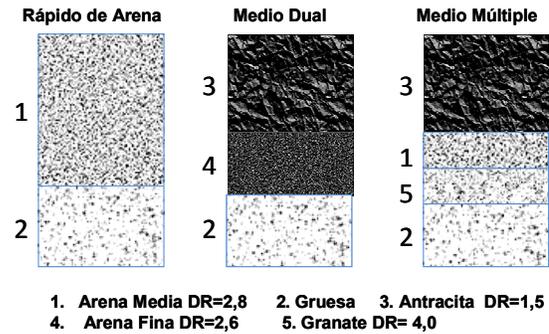


Figura 3. Tipo de filtros (DR = Densidad relativa) [9]
Figure 3. Filter type (Dr = relative Density) [9]

Se realizaron pruebas para el filtro en un solo medio (filtro rápido de arena), con arena; y en un medio dual con arena y antracita, de los cuales se determinó el más eficiente para utilizarlo posteriormente en el diseño del filtro. En la Tabla 3 se detallan los materiales que se utilizaron para hacer las pruebas, con su respectiva granulometría.

Tabla 3. Materiales utilizados en los dos tipos de filtros

Table 3. Materials used for both types of filters

MATERIAL	MALLA (No.)	DIÁMETRO DE PARTÍCULA	
		µm	in
HOJA DE CAFÉ	70	212	0,0083
GRAVA	6	3350	0,1310
ARENA	20	850	0,0331
ANTRACITA	20	850	0,0331

Para todos los experimentos se asumió un volumen de 80 ml de solución de cromo hexavalente (1000 ppm). Las alturas de los lechos se sometieron a modificaciones de acuerdo a las eficiencias obtenidas durante el proceso.

4. DISEÑO DEL FILTRO TIPO COLUMNA A ESCALA DE LABORATORIO

4.1 Saturación de la Biomasa

Tomando una solución de 1000ppm de cromo hexavalente y una hoja de café variedad castillo seca y triturada (malla #70) se realizó el experimento de saturación de la biomasa por 6 horas en batch. Para estos experimentos se tomó un volumen de solución de 50ml. De la Figura 4 se determina el punto de ruptura el cual se encuentra ubicado en $c/c_0 = 0,0328$, el tiempo de punto de ruptura es $t_b = 1,67$. El valor de t_d se encuentra alrededor de las 5,42 h, este punto se llama c_d y representa el final de la curva de avance donde el lecho pierde su efectividad. [10]

4.2 Selección Arena para el Filtro

Se seleccionó el filtro rápido de arena el cual se compone de una capa de grava y una capa de arena. El café se situó en 3 posiciones diferentes (inferior, media y superior). Los primeros resultados se obtuvieron dejando pasar una solución de 30 ml directamente, para los experimentos posteriores se retuvo el volumen de solución por 20 y 40 min.; el mismo procedimiento se realizó para las 3 arenas. Por último sólo se depositó el café seco triturado (sin arena) hasta alcanzar los 17 mm y se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente.

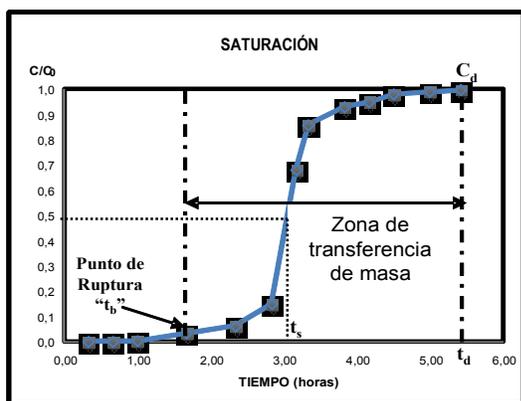


Figura 4. Curva de saturación para la hoja de café variedad castillo

Figure 4. Saturation curve for the coffee leaf castillo variety

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos durante las pruebas con el filtro empleando diferentes tipos de arenas, de las cuales se pudo concluir, que la arena para filtros de piscina (C) es la que presenta las mejores eficiencias (60% aproximadamente).

4.3 Determinación de los Componentes del Filtro

Se adaptaron los sistemas utilizados para el filtrado de afluentes en el filtrado de efluentes. Se realizaron pruebas para el filtro en un solo medio (filtro rápido de arena), con arena; y en un medio dual con arena y antracita, de los cuales se determinó el más eficiente. En la Tabla 4 se detallan los materiales que se utilizaron para hacer las pruebas con su respectiva granulometría. Para todos los experimentos se asumió un volumen de 80 ml de solución de cromo hexavalente (1000 ppm).

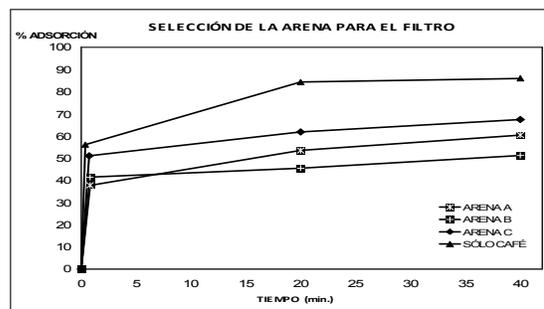


Figura 5. Gráfico para la selección de arenas
Figure 5. Graph for the sand selection

4.3.1 Filtro rápido de arena

Se compone de una capa de grava y una capa de arena. El café se sitúa en 3 posiciones diferentes (inferior, media y superior). La solución de cromo se dejó pasar directamente con el fin de determinar la configuración del filtro más eficiente.

Tabla 4. Materiales usados para los filtros
Table 4. Materials used for filters

MATERIAL	MALLA (No.)	DIÁMETRO DE PARTÍCULA	
		µm	in
HOJA DE CAFÉ	70	212	0,0083
GRAVA	6	3350	0,1310
ARENA	20	850	0,0331
ANTRACITA	20	850	0,0331

En la Tabla 5 se pueden observar las eficiencias obtenidas para cada disposición del filtro. Se puede concluir que la mejor disposición fue la R4 ya que presentó el mayor porcentaje de adsorción, pero las eficiencias son demasiado bajas por lo tanto este tipo de filtro se descarta.

4.3.2 Medio dua

Se compone de una capa de grava, una de arena y una de antracita. El café se sitúa en 4 posiciones diferentes (inferior, dos intermedias y superior).

En la Tabla 5 se resumen los resultados de los cuales se determinó que la mejor disposición es la D3, D5 y D6 debido que presentan las mayores eficiencias, se procedió a realizar algunas variaciones modificando las alturas de los lechos con el fin de hacerlo mas eficiente.

Tabla 5. Eficiencias para cada posición de la capa de café utilizado

Table 5. Efficiencies for each position of the coffee layer using

TIPO DE FILTRO	NOMBRE	MATERIAL	ALTURA S (mm)	EFICIENCIA (%)
RAPIDO DE ARENA	R1	HOJA DE CAFÉ GRAVA ARENA HOJA DE CAFÉ	17 12 72 17	14
	R2	GRAVA ARENA GRAVA	36 72 12	10.4
	R3	HOJA DE CAFÉ ARENA GRAVA	17 72 36	7.6
	R4	HOJA DE CAFÉ ARENA GRAVA	17 72 12	14.4
	R5	ARENA HOJA DE CAFÉ GRAVA	72 17 36	4.8
	R6	GRAVA ARENA HOJA DE CAFÉ	36 72 17	8.4
MEDIO DUAL	D1	GRAVA ARENA ANTRACITA HOJA DE CAFÉ	12 17 36 17	12.8
	D2	GRAVA ARENA ANTRACITA HOJA DE CAFÉ	36 17 36 17	13.2
	D3	GRAVA ARENA HOJA DE CAFÉ ANTRACITA	12 17 17 36	38.8
	D4	GRAVA ARENA HOJA DE CAFÉ ANTRACITA	36 17 17 36	23.2
	D5	GRAVA HOJA DE CAFÉ ARENA ANTRACITA	12 17 17 36	37.6
	D6	GRAVA HOJA DE CAFÉ ARENA ANTRACITA	36 17 17 36	37.2
	D7	HOJA DE CAFÉ GRAVA ARENA ANTRACITA	17 12 17 36	18
	D8	HOJA DE CAFÉ GRAVA ARENA ANTRACITA	17 36 17 36	23.6

4.4 Variaciones Filtro Dual

Para mejorar la eficiencia se optó por realizar las siguientes modificaciones en el filtro.

- Aumentar la relación masa de biomasa / volumen de disolución de cromo modificando el volumen de la solución (60ml).
- Modificar la disposición D3 de la Tabla 6 retirando la capa de arena.
- Utilizar una disposición con solo hoja de café aumentando la altura del lecho a 43mm.
- Combinar las disposiciones D3 y D5 de la Tabla 6 ya que fueron las de mayor eficiencia modificando la altura del lecho de café a 26mm e introduciendo un segundo lecho de café de 17 mm.

Para estos experimentos se retuvo la solución aproximadamente 5 horas. En la Figura 6 se encuentran relacionados los resultados obtenidos.

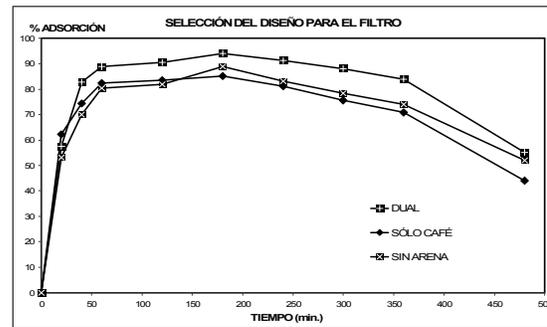


Figura 6. Comparación de las tres posibles disposiciones del filtro

Figure 6. Comparison of the three possible dispositions of the filter

De la Figura 6 se puede concluir que la disposición que presentó mayores porcentajes de adsorción durante el tiempo de pruebas fue la del filtro dual con dos capas de café. Se observa que la eficiencia más alta se da a las 3 horas de iniciado el proceso y fue de 94% y la más baja se presenta a los 20 minutos con una eficiencia de 57.6%.

4.5 Modelo del filtro a Nivel de Laboratorio

Después de determinar el número de capas que lleva el filtro y teniendo las medidas de todas las alturas de las capas, se procede a escalarlas a nivel de laboratorio. En la Tabla 6 se resumen las medidas que se utilizaron para la construcción del filtro tipo columna, cada una de las alturas y el diámetro se multiplicaron por un factor de 3, ya que con este tamaño fue fácil la manipulación en el laboratorio.

Tabla 6. Medidas escaladas para la construcción del filtro tipo columna

Table 6. Measures scaled for the construction of the filter type column

MEDIDAS DEL FILTRO PARA PRUEBAS EN EL LABORATORIO		MEDIDAS ESCALADAS
DIÁMETRO 38 mm.		DIÁMETRO 90 mm.
VOLUMEN 60 mL		VOLUMEN 550 mL
MATERIAL	ALTURA (mm.)	ALTURA DEFINITIVA (mm.)
Grava	4	12
Hoja de Café	26	78
Arena	6	18
Hoja de Café	17	51
Antracita	12	36

La altura total del cilindro es la suma de todas las capas (195 mm), más la altura que ocupan los 550 ml de solución (90 mm). Además se dejan 57.5 mm con el fin de evitar problemas de rebose, por lo tanto la altura definitiva del tanque cilíndrico fue de 343 mm.

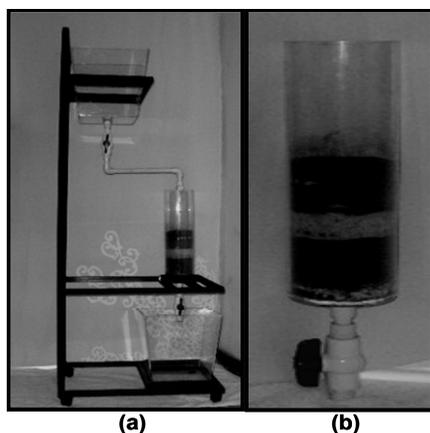


Figura 7. (a) Representación del sistema de filtración. (b) Biofiltro

Figure 7. (a) Representation of the filtration system. (b) biofilter

En la Figura 7, se observa la columna que se construyó a nivel de laboratorio, en la cual se

realizaron los experimentos para determinar la funcionalidad del filtro tipo columna a una escala mayor.

4.6 Capacidad de la Columna de Adsorción

El ancho y la forma de la zona de transferencia de masa dependen de la zona de adsorción, de la tasa de flujo, de la tasa de transferencia de masa hacia las partículas y de la difusión en los poros. Se puede demostrar que la capacidad total o estequiométrica de la torre del lecho empacado, cuando el lecho alcanza el equilibrio completo con la alimentación, es proporcional al área entre la curva y una línea en $c_d/c_0 = 1$, como se muestra en la Figura 8. El área total sombreada representa la capacidad total o estequiométrica del lecho [6, 7, 11]:

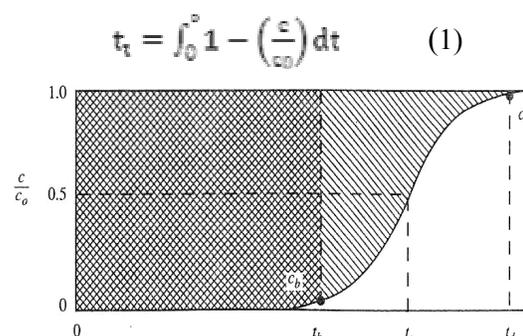


Figura 8. Determinación de la capacidad de una columna a partir de la curva de avance [7]

Figure 8. Determination of the capacity of a column from the advance curve [7]

Donde t_t es el tiempo equivalente a la capacidad total o estequiométrica. Se determina el punto de ruptura en la Figura 4, el cual se encuentra ubicado en $c/c_0 = 0,0328$, el tiempo de punto de ruptura es $t_b = 1.67$ El valor de t_d se encuentra en un tiempo de 5,42 h. Al integrar numéricamente, la áreas son $A_1 = 1,65$ h y $A_2 = 1,30$ h. El tiempo equivalente a la capacidad total o estequiométrica del lecho es: [7, 11]

$$t_t = \int_0^{t_d} 1 - \left(\frac{c}{c_0}\right) dt = A_1 + A_2 = 1.65 + 1.30 = 2.95h.$$

La capacidad utilizable del lecho hasta el tiempo de punto de ruptura t_b , es el área cuadrículada [7, 11].

$$t_u = \int_0^{t_b} 1 - \left(\frac{c}{c_0}\right) dt \quad (2)$$

donde t_u es el tiempo equivalente a la capacidad utilizable o el tiempo en el cual la concentración del efluente alcanza su máximo nivel permisible. El valor de t_u suele ser muy cercano al de t_b [7, 8, 11].

$$t_u = \int_0^{t_b=1.67} 1 - \left(\frac{c}{c_0}\right) dt = A_1 = 1.65h.$$

La relación t_u/t_t es la fracción de la capacidad o longitud total del lecho utilizada hasta el punto de ruptura. Así, para una longitud total del lecho de H_T , H_L es la longitud del lecho utilizada hasta el punto de ruptura [7,8, 11].

$$H_L = \frac{t_u}{t_t} H_T \quad (3)$$

Por tanto, la fracción de la capacidad total usada hasta el punto de ruptura es:

$$\frac{t_u}{t_t} = \frac{1.65}{2.95} = 0,5593 \quad (4)$$

La longitud del lecho no usado H_{LNU} en metros, es entonces la fracción no usada multiplicada por la longitud total [7]:

$$H_{LNU} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_T \quad (5)$$

H_{LNU} representa la sección o zona de transferencia de masa; depende de la velocidad del fluido y es esencialmente independiente de la longitud total de la columna.

La longitud del lecho usado es $H_L=0.5593*(5mm)= 2.7966$ mm. Para calcular la longitud del lecho no usado:

$$H_{LNU} = \left(1 - \frac{t_u}{t_t}\right) H_T = (1 - 0.5593) 5mm = 2.2035 \text{ mm.}$$

Después, el lecho adsorbente a escala completa se diseña simplemente calculando primero la longitud del lecho necesaria para lograr la capacidad utilizable requerida, H_L , en el punto de ruptura. El valor de H_L es directamente proporcional a t_b . Por consiguiente, la longitud de H_{LNU} de la sección de transferencia de masa

simplemente se suma a la longitud H_L necesaria para obtener la longitud total, H_T [7, 11]:

Se obtiene la longitud total, H_T :

$$H_T = 2.7966 \text{ mm} + 2.2035 \text{ mm} = 5 \text{ mm.}$$

De acuerdo a la altura del lecho de hoja de café que se va a emplear, el tiempo de ruptura es igual a 75 horas, el nuevo H_L se obtiene de la relación entre los tiempos de punto de ruptura multiplicada por el anterior H_L :

$$H_L = \frac{75 \text{ h}}{1.67h} (2.7966) = 125.5958 \text{ mm}$$

$$H_T = 125.5958 \text{ mm} + 2.2035 \text{ mm} = 127.7993 \text{ mm.}$$

Este procedimiento de diseño se usa con mucha frecuencia y su validez depende de que las condiciones en la columna de laboratorio sean semejantes a las de la unidad a escala real. La unidad de diámetro pequeño debe estar bien aislada para parecerse a la torre de diámetro grande, que trabaja adiabáticamente. La velocidad de masa en ambas unidades debe ser igual y el lecho debe tener la longitud suficiente para contener una zona de transferencia de masa en estado estacionario (L1). La dispersión axial o la mezcla axial pueden no ser exactamente iguales en las dos torres, pero con el cuidado necesario, este método de diseño es muy útil [7, 12]. Un procedimiento alternativo aproximado que se puede usar en lugar de integrar y obtener áreas, es suponer que la curva de avance de la Figura 8 es simétrica en $c/c_0=0.5$ y t_s . Entonces, el valor de t_t de la ecuación (4) es simplemente t_s . Esto implica que el área bajo la curva entre t_b y t_s es igual al área sobre la curva entre t_s y t_d [7].

4.7 Variables Principales en el Diseño del Filtro Tipo Columna

El filtro está compuesto de 5 capas, distribuidas como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Capas utilizadas en el filtro
Table 7. Layers used in the filter

CAPA	ALTURA, h (mm)
Antracita	36
Hoja de café	51
Arena	18
Hoja de café	78
Grava	12

Tabla 8. Propiedades de los materiales utilizados en el biofiltro

Table 8. Properties of the materials used in the biofilter

MATERIAL	POROSIDAD, e (%)	DENSIDAD RELATIVA
Antracita	46.92	1.15
Hoja de café	63.61	0.4
Arena	34.93	1.9

En la Tabla 8 se pueden observar algunas propiedades de los materiales utilizados en el filtro tipo columna.

Tabla 9. Características de filtros
Table 9. Characteristics of filters

Características	Filtros lentos de arena	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	2-5 (<12 m/d)	120 m/d	180 - 480 m/d
Medio	Arena	Arena	Arena y Antracita
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado: Fino a grueso	Estratificado: Grueso a fino
Duración carrera	20-60 días	12-36 horas	12-36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0.6 m. Final: 1.2 m.	Inicial: 0.3 m. Final: 2.4-3 m.	Inicial: 0.3 m. Final: 2.4-3 m.
Agua de lavado	No usa	2-4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0.6-1.0 m.	0.60-0.75 m.	Antracita 0.4-0.6 m. Arena: 0.15-0.3 m.
Profundidad de grava	0.30 m.	0.30-0.45 m.	0.30-0.45 m.
Drenaje	Tubería perforada	Tubería perforada Falsos fondos	Tubería perforada Falsos fondos

Se alcanzaron mejores eficiencias utilizando un filtro con medio dual, llamados filtros de alta tasa, las pruebas se realizaron con la solución retenida; para el diseño se eligió la menor velocidad con la que se puede trabajar en este tipo de filtros, de tal forma que se conserve la solución el mayor tiempo posible retenida, por lo tanto de la Tabla 9 se asume una velocidad de filtración de 180 m/d pero este valor se utilizaría si el filtro se fuera a diseñar a escala real, más adelante se determinan las medidas a escala de laboratorio.

4.7.1 Caudal de diseño

Se utilizó un caudal promedio de una curtiembre de aproximadamente 8000m³/d.

4.7.2 Dimensionamiento del filtro tipo columna

[7, 13] Con el caudal generado en la curtiembre se encuentra el número de filtros (N) necesario para el proceso de adsorción, así como también el tamaño de los mismos:

$$N = 0.044\sqrt{Q} \quad (6)$$

Donde Q=caudal de la planta [m³/d]

Para la planta que genera un caudal 8000 m³/d se necesitarían 4 filtros, cada uno recibirá un caudal de 2000 m³/d.

Para calcular el área del filtro (A)

$$A = \frac{Q}{v} \quad (7)$$

$$A = \frac{8000 \text{ m}^3/\text{d}}{4(180 \text{ m}/\text{d})} = 11.111 \text{ m}^2$$

Los valores anteriores sirven para dimensionar el filtro a escala real, para el filtro a escala de laboratorio, se aplicó una escala de 12,5 directamente a la velocidad. Las medidas que se presentan a continuación son las utilizadas para el diseño del filtro a escala de laboratorio:

Área “A” = 729 cm²

Velocidad de filtración “V” = 14.4 m/d

Ancho del filtro “b”,

$$b = \sqrt{A} = 27 \text{ cm} \quad (8)$$

Largo del filtro “l_f”:

$$l_f = b * 1.2 = 32.4 \text{ cm} \quad (9)$$

Se recomienda dejar una holgura del 20% en la altura del filtro para evitar el reboce del fluido.

4.7.3 Selección del medio filtrante

Se realizó un análisis granulométrico de los diferentes materiales utilizados en la fabricación del filtro, con el fin de determinar el coeficiente de uniformidad “CU” según la ecuación (10). Los resultados se resumen en la Tabla 10. Se determinaron que los lechos son uniformes debido que CU es ≤ 2.

$$CU = \frac{d_{50}}{d_{10}} = \frac{\text{Tamaño partícula del 60\% que pasa}}{\text{Tamaño partícula del 10\% que pasa}} = \frac{d_{50}}{TE} \quad (10)$$

Tabla 10. Análisis granulométrico
Table 10. Grain sized analysis

MEDIO FILTRANTE	d_{10} (mm)	d_{60} (mm)	CU
Antracita	0.87	1.5	1.7
Arena	0.9	1.6	1.8
Hoja de café	0.1	0.2	2

4.8 Cálculo de la Pérdida de Carga

Para determinar la pérdida de carga en un filtro limpio, las ecuaciones que se emplean son las de Carmen Kozeny, Fair y Hatch, Rose y Hazen [9]. Para filtros lentos (lechos empacados homogéneamente) la ecuación de Rose será:

$$\frac{h}{L} = 0.178 \frac{C_D v^2 \alpha}{\epsilon e^* \beta} \sum \frac{P_i}{d_i} \quad (11)$$

$$C_D = \frac{24}{N_{RE}} + \frac{3}{\sqrt{N_{RE}}} + 0.34 \quad (12)$$

$$N_{RE} = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (13)$$

$$\frac{A}{V} = \frac{\alpha}{\beta} \sum \frac{P_i}{d_i} \quad (14)$$

$$A = \alpha d^2 \quad (15)$$

$$V = \beta d^3 \quad (16)$$

$$\psi = \frac{A_0}{A} = \frac{\pi d_0^2}{\alpha d^2} = 4.84 \frac{\beta^{2/3}}{\alpha} \quad (17)$$

Donde:

h = Pérdida de carga a través del lecho [m]; C_D = Coeficiente de arrastre; e = Porosidad del lecho [volumen de vacíos/volumen del lecho]; L = Profundidad del lecho [m]; d = Diámetro característico de los granos [m]; v = Velocidad de filtración [m/s]; g = gravedad [m/s²]; N_{RE} = Número de Reynolds; A = Área superficial real del grano [m²]; V = Volumen real del grano [m³]; ψ = Factor de esfericidad; d_0 = Diámetro del grano esférico de volumen equivalente [m]; A_0 = Área superficial de la esfera de diámetro d_0 [m²]. En la Tabla 11 se pueden hallar los valores determinados de α , β y ψ .

Tabla 11. Valores de factores de forma
Table 11. Values of form factors

Tipo de grano	β	α/β	ψ
Angular	0.64	6.9	0.81
Afilada	0.77	6.2	0.85
Erosionada	0.86	5.7	0.89
Redondeada	0.91	5.5	0.91
Esférica	0.52	6.0	1.00

Tabla 12. Cálculo para pérdidas por antracita
Table 12. Calculation for losses by anthracite

No Tamiz (1)	Tamaño promedio d_i (cm) (2)	Antracita retenida P_i (%) (3)	N_{RE} (4)	C_{Df} (5)	P_i/d_i (6)	$C_{Df} P_i/d_i$ (7)
6-12	0.2386	34.03	0.304	84.830	142.581	12095.207
12-20	0.1202	56.5	0.153	164.936	469.987	77517.757
20-30	0.0714	6.51	0.091	274.436	91.168	25019.923
30-40	0.0505	1.39	0.064	385.731	27.618	10652.972
40-50	0.0357	0.88	0.045	542.702	24.531	13312.978
50-70	0.0252	0.70	0.032	765.079	27.617	21129.294
70-100	0.0178	0.00	0.023	1078.076	0	0
100-140	0.0126	0.00	0.016	1520.008	0	0
140-200	0.0089	0.00	0.011	2144.146	0	0
					783.503	159728.132

Para Antracita. En la Tabla 12 se encuentran calculados los valores para determinar las pérdidas en el lecho limpio de antracita. Se asume la antracita con forma erosionada, $\alpha/\beta = 5.7$ y se obtiene con la ecuación (11): $h_1 = 1,549E-03$ m.

Tabla 13. Cálculo para pérdidas por arena
Table 13. Calculation for losses by sand

No Tamiz (1)	Tamaño promedio d_i (cm) (2)	Arena retenida P_i (%) (3)	N_{RE} (4)	C_{Df} (5)	P_i/d_i (6)	$C_{Df} P_i/d_i$ (7)
6-12	0.2386	35.01	0.304	84.830	146.715	12445.821
12-20	0.1202	57.11	0.153	164.936	475.067	78355.622
20-30	0.0714	5.22	0.091	274.436	73.096	20060.227
30-40	0.0505	1.94	0.064	385.731	38.433	14824.870
40-50	0.0357	0.48	0.045	542.702	13.383	7262.998
50-70	0.0252	0.12	0.032	765.079	4.694	3591.099
70-100	0.0178	0.06	0.023	1078.076	3.131	3375.222
100-140	0.0126	0.03	0.016	1520.008	2.709	4118.417
140-200	0.0089	0.03	0.011	2144.146	3.773	8090.219
					761.001	152124.495

Para arena. La Tabla 13 muestra los valores para determinar las pérdidas en el lecho limpio de arena. Se asume la arena con forma erosionada, $\alpha/\beta = 5.7$ y se obtiene con la ecuación (11): $h_2 = 4,332E-03$ m.

Para hoja de café. En la Tabla 14 se encuentran los valores para determinar las pérdidas en el lecho limpio con hoja de café. Se asume la hoja de café con forma afilada, $\alpha/\beta = 6.2$ y se obtiene con la ecuación (11): $h_3 = 4,777E-02$ m.

Tabla 14. Cálculo para pérdidas por hoja de café
Table 14. Calculation for losses by coffee leaf

No Tamiz (1)	Tamaño promedio d_i (cm) (2)	Café retenido P_i (%) (3)	N_{RE} (4)	C_{di} (5)	P/d_i (6)	$C_{m} P/d_i$ (7)
6-12	0.2386	100	0.304	84.830	419.038	35547.037
12-20	0.1202	100	0.153	164.936	831.890	137208.511
20-30	0.0714	100	0.091	274.436	1400.280	384287.346
30-40	0.0505	100	0.064	385.731	1980.295	763861.346
40-50	0.0357	98.95	0.045	542.702	2768.459	1502448.602
50-70	0.0252	62.94	0.032	765.079	2495.858	1909537.265
70-100	0.0178	28.92	0.023	1078.076	1621.615	1748225.169
100-140	0.0126	11.31	0.016	1520.008	896.752	1363069.935
140-200	0.0089	0.00	0.011	2144.146	0	0
					12414.198	7844185.315

La pérdida de energía total es:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 = 0,0537 \text{ m} \quad (18)$$

5. SIMULACIÓN DEL FILTRO TIPO COLUMNA

La geometría del filtro no es un factor importante para el funcionamiento del filtro, aunque se debe tener en cuenta que algunas geometrías presentan ventajas a la hora de manufacturar el dispositivo. El caudal, la velocidad y el área de filtración son los factores de determinan las dimensiones del filtro. Para este proyecto se seleccionó una geometría rectangular como se muestra en la Figura 9, además de ser de fácil en construcción, presenta ventajas para la adaptación del sistema de drenaje y la canaleta de lavado.

Los filtros convencionales ya tienen definidos los parámetros de altura del lecho, así como las velocidades de acuerdo al tipo de filtro requerido, en este caso se adaptaron los filtros de afluentes para efluentes, lo cual permitió elegir la mínima velocidad a emplear para este tipo de filtros, se debe buscar que el agua esté el mayor tiempo posible en contacto con la hoja de café. La simulación y validación del filtro tipo

columna se realizó con el programa COSMOS FloWorks, Se seleccionó como fluido el agua teniendo en cuenta para ello que las propiedades son similares a las del agua residual de una curtiembre, puesto que tiene iones y no sólidos suspendidos.

5.1 Parámetros de Entrada

Para la simulación se emplearon las siguientes consideraciones para la simulación en el programa, algunos de los parámetros de simulación se muestran en la Tabla 15

Tabla 15. Parámetros de simulación
Table 15. Parameters of simulation

TIPO DE ANÁLISIS	INTERNO
TIPO DE FLUJO	LAMINAR
FLUIDO:	AGUA
VELOCIDAD DE ENTRADA	1,6667E-4 m/s
PRESIÓN DE SALIDA	101325Pa

Se crearon los medios porosos que representa cada uno de los lechos. Los parámetros aplicados a cada uno de estos se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros de los medio porosos
Table 16. Parameters of medium porous

NOMBRE	HOJA DE CAFÉ	ARENA	ANTRACITA
POROSIDAD	0.6361	0.3493	0.4692
TIPO DE PERMEABILIDAD	Isotrópica	Isotrópica	Isotrópica
TAMAÑO DEL PORO "D" (X10 ⁻³ m)	0.1395	0.9588	1.0684

Se seleccionó permeabilidad isotrópica puesto que los lechos se consideran uniformes porque el coeficiente de uniformidad para cada uno es ≤ 2 , razón por la cual se asumen partículas esféricas, lo que conlleva a que la permeabilidad sea igual en todas las direcciones.

5.2 Resultados de la Simulación

La Figura 9 muestra el comportamiento que tendrá el fluido en el filtro. A la entrada se nota una turbulencia, esto se debe a que el fluido no se traslada por un conducto vacío sino que choca con el primer lecho lo que hace que las partículas de agua repercutan y se genere esta turbulencia

un instante antes y a medida que atraviesan los dos primeros lechos.

La simulación mostró que las velocidades que se manejan en la entrada, en cada uno de los lechos y sobre el drenaje son las más bajas, estas se encuentran en un rango de 0 a 0.01 m/s; los resultados concuerdan con los cálculos teóricos realizados. Al inicio sobre la salida se notan líneas de color azul agua marina, en este punto la velocidad es menor, estas se encuentran en un rango de 0.03 – 0.04m/s, la velocidad sigue aumentando (color verde) las cuales se encuentran entre 0.04 – 0.06 m/s, luego la velocidad sigue aumentando (color amarillo) con valores de 0.06 a 0.07 m/s, y por último el fluido después de atravesar toda la tubería (color rojo) adquiere una velocidad más alta se encuentra en color rojo y está ubicada entre 0.09 a 0.1 m/s. Los cálculos teóricos de la velocidad a través de la tubería de salida fue de 0.0959 m/s, lo cual es muy aproximado al valor de la simulación.

Se calculó la caída de presión entre la entrada y salida del fluido, en la que se pudo comprobar su variación al atravesar los lechos; en algunas partes se presenta una caída de presión mayor que en otras debido a las capas de hoja de café, ya que allí es donde se presenta el tamaño de partícula más pequeño, además teóricamente ya se ha calculado que en estos lechos es donde se presentan las mayores pérdidas por el tamaño mismo de las partículas que producen resistencia a fluir.

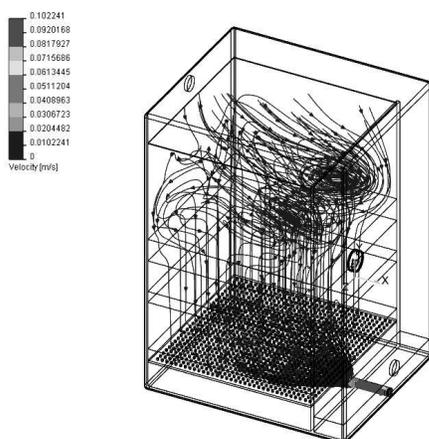


Figura 9. Comportamiento del fluido en el filtro
Figure 9. Behavior of the fluid in the filter

La mayor presión se encuentra a la entrada y presenta una variación entre 101393 – 101401 este valor se mantiene hasta que atraviesa el lecho de antracita y aproximadamente la mitad de la capa de hoja de café, luego la presión cae un poco en un rango de 101370 – 101378 Pa y con esta presión el fluido termina de atravesar la hoja de café, para pasar a la capa de arena en donde la presión varía en un rango de 101355 – 101370 Pa, en la mitad de este lecho disminuye hasta valores de 101347 – 101355 Pa y permanece así hasta que empieza la entrada de la tubería de salida, en esta la presión se hace mínima hasta que atraviesa toda la tubería, hasta llegar a la presión de salida alrededor de los 101324 – 101332Pa.

La turbulencia en el flujo a la entrada no afecta la eficiencia del filtro, ya que después el fluido se reparte en toda la superficie filtrante. Si el fluido solamente se fuera por un camino si se afectaría la eficiencia del filtro, porque se saturaría solo esa parte de la biomasa.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de la bioadsorción en la purificación de aguas residuales presenta un gran potencial, pues las biomásas naturales, se pueden obtener en grandes cantidades, son baratas y pueden remover selectivamente Cromo (VI) de soluciones acuosas. Los resultados obtenidos permiten concluir que la biomasa es una buena alternativa para la implementación de filtros con la capacidad de remover el Cr (VI) de soluciones acuosas a flujo continuo. [13]

REFERENCIAS

- [1] WORLD BANK GROUP. Pollution Prevention and Abatement Handbook Tanning and Leather Finishing April 2007.
- [2] DA COSTA, A. C. A. Bioabsorção de Metais – Algas. CETEM. Brasil, 1994.

- [3] HIGUERA, O. F, GARCIA S. Reducción del cromo contenido en efluentes líquidos de la industria del cuero, mediante un proceso adsorción-desorción con algas marinas. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander: 2002.
- [4] VEGLIO, F., BEOLCHINI, F. Removal of metals by biosorption: a review. Hydrometallurgy. No.44, 301-316, 1997.
- [5] SERRANO L. Diseño y simulación de columnas de adsorción de Cromo de aguas tratadas de tenerías utilizando adsorbentes desarrollados en países Iberoamericanos. Bucaramanga, 2004. UIS.
- [6] GARCÍA A. Síntesis y caracterización de un material mesoporoso para la adsorción de iones Cr (III) y Cr (VI) en medio acuoso. Valencia 2001.
- [7] ROMERO, J.A. Acuípurificación, Diseño de sistemas de purificación de aguas.. Ed. Escuela Colombiana de Ingeniería, 185-219, 1995.
- [8] DEVINNY J., RAMESH J. A phenomenological review of biofilter models. Chemical Engineering Journal 113, 187-196, 2005.
- [9] IGWE, J. C., ABIA A.A. Bioseparation process for removing heavy metals. African Journal of Biotechnology Vol. 5 (12), 1167-1179, 16 June 2006.
- [10] AL-ASHEH, S., DUVNJAK, K. Binary metal sorption by pine bark: study of equilibria and mechanisms. Separation Science and Technology. No.33 , 1303-1329, 1998.
- [11] CHMIEL K., KONIECZNY A., PALICA M., JARZEBSKI A.B. Periodic operation of biofilters. A concise model and experimental validation. Chemical Engineering Science 60, 2845 – 2850, 2005
- [12] PARK D., SANG YUN Y., YOUNG KIM J., MOON PARK J. How to study Cr(VI) biosorption: Use of fermentation waste for detoxifying Cr(VI) in aqueous solution. Chemical Engineering Journal 2007.
- [13] RAMIREZ M., PEREIRA DA SILVA M., FERREIRA S, VASCO O. Mathematical models applied to the Cr(III) and Cr(VI) breakthrough curves. Journal of Hazardous Materials 146, 86-90, 2007.