

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA EN BIOTECNOLOGÍA DE LOS
RECURSOS NATURALES**

**Tesis previa a la obtención del Título de: INGENIERO EN
BIOTECNOLOGÍA DE LOS RECURSOS NATURALES**

**TEMA:
ESTUDIO ISOTÉRMICO DE BIOSORCIÓN
DE CROMO Y CADMIO EN SOLUCIÓN ACUOSA UTILIZANDO
RESIDUOS DE CÉSPED.**

AUTOR:

DANIEL XAVIER ANDRANGO CAIZAPANTA

DIRECTOR:

CRISTIAN LARENAS URÍA

QUITO, SEPTIEMBRE DE 2011

DEDICATORIA

A todo aquel que lea el presente trabajo.

AGRADECIMIENTO

A todos aquellos que se han encontrado conmigo en algún momento de la vida.

ÍNDICE GENERAL

TEMA	PÁGINA
Carátula	1
Dedicatoria	2
Agradecimiento	3
Índice General	4
Índice de Anexos	6
Capítulo I. Generalidades	8
I. A. Objetivos	8
I.A.1. General	8
I.A.2. Específicos	8
I.B. Justificación	8
I.C. Introducción	9
Capítulo II. Marco Teórico	10
II.A. El césped	10
II.B. Biosorción	13
II.B.1. Biosorción de metales pesados	15
II.B.2. Efecto del pH en la biosorción	17
II.C. Estudio isotérmico de biosorción	19
II.C.1 Isotermas de Langmuir	19
II.C.2 Isotermas de Freundlich	22
Capítulo III. Marco Metodológico	24
III.A. Materiales	24
III.B. Reactivos	24
III. C. Obtención Del Biosorbente	24

III. D. Efecto Del pH	27
III. D. 1. Efecto del pH en la biosorción de cromo	27
III. D. 2. Efecto del pH en la biosorción de cadmio	27
III.E. Cinéticas De Biosorción	28
III. E. 1. Cinéticas de biosorción de cromo	28
III. E. 2. Cinéticas de biosorción de cadmio	29
III.F. Isotermas De Biosorción	29
III. F. 1. Isotermas de biosorción de cromo	29
III. F. 2. Isotermas de biosorción de cadmio	29
Capítulo IV. Discusión de resultados	30
IV.A. Efecto del pH en la biosorción de cromo	30
IV.B. Efecto del pH en la biosorción de cadmio	31
IV.C. Cinéticas de biosorción de cromo	32
IV.D. Cinéticas de biosorción de cadmio	32
IV.E. Isotermas	33
IV.E.1. Isotermas de biosorción de cromo	34
IV.E.2. Isotermas de biosorción de cadmio	36
Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones	37
Bibliografía	40

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	PÁGINA
Figura 1. Pasto kikuyo	11
Figura 2. Parterres de Quito	13
Figura 3. La Celulosa	14
Figura 4. Eliminación de metales en aguas naturales por biomateriales	16
Figura 5. Columnas de biosorción	17
Figura 6. Isotermas de biosorción	25
Figura 7. Molienda de la matriz	26
Figura 8. Tamizado de la matriz	26
Figura 9. Ajuste de pH	28
Figura 10. Secado de la matriz	30
Gráfico 1. Efecto del pH sobre la biosorción de Cromo	31
Gráfico 2. Efecto del pH sobre la biosorción de Cadmio	31
Gráfico 3. Cinética de biosorción de cromo	32
Gráfico 4. Cinética de biosorción de cadmio	33
Gráfico 5. Isoterma de Langmuir para Cromo	35
Gráfico 6. Isoterma de Freundlich para cromo	35
Gráfico 7. Isoterma de Langmuir para Cadmio	36
Gráfico 8. Isoterma de Freundlich para cadmio	37
Diagrama 1. Obtención del biosorbente	25
Ecuación No.1.	20
Ecuación No.2.	21
Ecuación No.3.	21
Ecuación No.4.	22

Ecuación No.5.	23
Ecuación No.6.	23
Ecuación No.7.	23
Ecuación No.8.	23
Ecuación No.9.	23
Ecuación No. 10.	33
Ecuación No.11.	35
Ecuación No. 12.	34

Capítulo I. Generalidades.

I. A. Objetivos

I.A.1. General

- ✓ Estudiar isotérmicamente la capacidad de biosorción del césped modificado mediante procesos físicos en contacto con soluciones de concentraciones conocidas de cromo y cadmio para conocer las condiciones óptimas de remoción de dichos metales.

I.A.2. Específicos

- ✓ Generar la matriz de biosorbente mediante secado y modificación química del césped.
- ✓ Estudiar el efecto del pH en la capacidad de biosorción de la matriz.
- ✓ Estudiar el efecto del tiempo de contacto en la capacidad de biosorción de la matriz.
- ✓ Estudiar el efecto de la concentración del metal en capacidad de biosorción de la matriz.

I.B. Justificación

Las aguas contaminadas contienen una alta concentración de metales pesados, tales como el cromo y el cadmio, producto del uso de combustibles, pesticidas y variedades de productos que son elaborados con dichos metales, los mismos que son tóxicos y que afectan a la salud de las personas, animales y su entorno. La contaminación por cromo es particularmente significativa en los procesos de curtiembre del cuero y minería tan comunes en nuestro país. Ante este problema tan serio es de suma urgencia emplear herramientas como la biosorción para la bioremediación, la misma que nos permite contribuir a la evolución de técnicas sustentables en el campo de la conservación de los recursos naturales del Ecuador y el mundo, en este caso el agua. (SÁNCHEZ, 2008)

Considerando el concepto de sustentabilidad, resulta importante investigar diferentes matrices vegetales para biosorción de metales pesados, matrices que sean baratas y

ocasionen el menor impacto ecológico posible. Hoy en día existe una gran variedad de estudios sobre el tema, sin embargo en el ámbito local son muy pocas las implementaciones reales que se han aplicado en cuanto a la bioremediación; debido a factores económicos y de cierta manera sociales, por lo que el presente trabajo pretende investigar la capacidad de biosorción del césped para su uso en bioremediación de aguas contaminadas con cromo y cadmio, residuos que de otra manera aumentarían el caudal de basura que genera la sociedad.

I.C. Introducción

A nivel mundial la contaminación con metales pesados ha dejado una triste secuela de tragedias ecológicas de gran impacto sobre el ambiente global. Por citar un caso: en el año de 1998 en Coto de Donana, aproximadamente un millón de metros cúbicos de lodos que contenían cadmio y otros metales terminaron en el río Guadimar afectando significativamente los sensibles lugares de reproducción aviar¹. En el Ecuador la situación no es menos alarmante, por ejemplo, en un estudio reciente realizado en el río Chico (puente limítrofe de la provincia del Azuay), se encontró que “presenta una contaminación severa” por metales como cromo, plomo y arsénico entre otros, cuya concentración sobrepasa los valores permitidos según los Criterios de Calidad Admisibles para la Preservación de Flora y Fauna. Este monitoreo realizado por el laboratorio BSI Inspectorate del Ecuador S.A., determinó que la contaminación se debe especialmente a la presencia de los metales derivados de las operaciones mineras desarrolladas en la Provincia del Azuay².

Como vemos, el problema de aguas contaminadas con metales pesados (entre ellos el cromo y el cadmio) lejos de disminuir tiende a magnificarse debido a la intensificación y masificación de las industrias que generan dichos contaminantes de modo que es en

¹ DR. JIM FIELD. Bioremediación de metales pesados. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://binational.pharmacy.arizona.edu/documents/Bioem-HM-es-JAF.pdf>

² COORDINADORA NACIONAL POR LA DEFENSA DE LA VIDA Y LA SOBERANÍA. Minería provoca alarmante contaminación en ríos de Tenguel. 24/04/2008 En línea: <http://www.noalamina.org/mineria-latinoamerica/mineria-ecuador/ecuador-mineria-provoca-alarman-te-contaminacion-rios-tenguel>

realidad urgente generar un tratamiento que reduzca estos niveles de contaminación, tratamiento que además debe ser accesible a la economía nacional.

Considerando lo antedicho, el presente trabajo pretende utilizar los residuos de celulosa obtenidos de la poda del césped, también conocido como kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) muy común en los jardines de los hogares ecuatorianos así como en parques, plazas, parterres, etc. Esta especie originaria de África³ se caracteriza por ser de rápido crecimiento y muy resistente y adaptable, y lo más importante es un residuo considerado como “basura” o “desecho”, por lo que se pretende restaurar este concepto al utilizar una matriz elaborada a partir de dichos residuos para remediar aguas contaminadas con cromo y cadmio.

Capítulo II. Marco Teórico.

II.A. El césped

El césped o kikuyo es un pasto robusto, que se extiende por rizomas. Su nombre viene de los Kikuyu, una etnia del este de África, de la región donde es originario. Este pasto fue introducido en sudamérica con el fin de mejorar los potreros para la cría de ganado.

Su nombre científico es *Pennisetum clandestinum* y las siguientes son sus categorías taxonómicas superiores: Reino: Plantae; Subreino: Traqueobionta (plantas vasculares); Superdivisión: Spermatophyta (plantas con semillas); División: Magnoliophyta (plantas con flor); Clase: Liliopsida (monocotiledóneas); Subclase: Commelinidae; Orden: Cyperales; Familia: Poaceae. A continuación se muestra una descripción técnica de esta hierba⁴:

Hábito y forma de vida: Planta perenne, rastrera, formando matas. Puede trepar, apoyándose en arbustos.

Tamaño: De 5-10 cm de longitud.

³ NATIONAL WEEDS STRATEGY. Kikuyu grass. Visto online: 27/06/2011 En línea: <http://www.weeds.org.au/cgi-bin/weedident.cgi?tpl=plant.tpl&ibra=all&card=E27>

⁴ CONABIO. *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/pennisetum-clandestinum/fichas/ficha.htm>

Tallo: De corto crecimiento, marcadamente rastreros, con entrenudos cilíndricos, glabros (sin ornamentación), de 1-2 cm de longitud; nudos glabros.

Hojas: Glabras o con pelos. Vainas esparcidamente vilosas en el envés a glabras, con márgenes membranosos y secos; lígula en forma de anillo de pelos de 1-2 mm de longitud, láminas foliares planas o conduplicadas (dobladadas a lo largo de su nervio medio), con el ápice obtuso, de (1.5) 2 a 9 cm de longitud, de 2 a 5 mm de ancho, glabras o esparcidamente vilosas en la base.

Inflorescencia: Inconspicua, escondida entre las vainas, compuesta, con espigas cortas axilares. Sólo se pueden ver los estambres por fuera cuando florece.

Espiguilla/Flores: Espiguilla 2 a 3 (4), de 1.4 a 1.8 cm de longitud, escasas, ocultas en las vainas superiores, una espiguilla pedicelada y las demás sésiles, pedicelo de la espiguilla de 2 a 5 mm de longitud, cada una con 15 a 16 cerdas hasta de 1 cm de longitud, glumas ausentes; lema de la flor estéril igual a la lema de la flor fértil, con varias nervaduras, pálea casi igual a la lema. Estambres y estigmas exertos.

Raíz: Rizomas fuertes y estolones bien desarrollados.

Características especiales: La floración puede pasar desapercibida por la inflorescencia inconspicua.



Figura 1. Fuente: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/pennisetum-clandestinum/fichas/ficha.htm>. Pasto kikuyo.

Es una planta muy resistente, estos son algunos de sus requerimientos básicos de crecimiento⁵:

Ambientes: Templados a tropicales, soleados, cálidos, húmedos a semi-secos. Gran adaptación a diferentes tipos de ambientes.

Requerimiento lumínico: Medio / alto.

Suelos: Todo tipo de suelos, de arcillosos a arenosos, PH desde 5,5 a 8,5.

Agua de riego: Tolera diferentes tipos de agua en cuanto a calidad, incluso aguas un poco salinas.

Mantenimiento de la tasa de crecimiento: Media / Alta.

Corte horizontal: Alturas de corte de 2 a 5 cm.

Riego: Abundante en época cálida, tolera sequías.

Fertilización: De 2 a 4 por año.

Sanidad Malezas: Es muy competitivo. No son problema.

Enfermedades: Resistente a enfermedades. Declina por exceso de colchón. El acolchonamiento requiere de corte vertical o cortes agresivamente bajos para recuperarlo.

El kikuyo puede reproducirse por medio de semillas, pero su principal método de propagación es por medio de sus rizomas: cualquier trozo de estos puede desarrollarse hasta formar otra gran mata de kikuyo.

En estas últimas décadas ha demostrado ser una de las plantas más invasoras que han llegado al continente, donde se ha propagado por casi todos los potreros y campos fértiles, desplazando a la mayor parte de las hierbas que crecen en estos lugares, y en las ciudades del Ecuador es un elemento casi indispensable en el ornato público de parques, plazas y parterres. En la ciudad de Quito, la Alcaldía les da un mantenimiento periódico, generando así grandes cantidades de residuos de césped cada mes.

⁵ EDIN. Césped kikuyo. 2000. En línea:
http://www.edin.com.ar/cesped_kikuyo_panes_tepes_alfombras_semillas_fertilizacion.htm



Figura 2. Fuente: <http://imagenesfotos.com/fotos-de-quito/>. Parterres de Quito.

Queda claro, entonces que el césped genera abundantes cantidades de residuos que bien podrían ser utilizados para los procesos de biorremediación por biosorción.

II.B. Biosorción

El proceso de Biosorción puede ser definido como la “capacidad de los materiales biológicos para acumular metales pesados de aguas residuales a través de mediación metabólica o por vías físico-químicas de captación”⁶. Más específicamente se puede decir que la biosorción es la retención de iones metálicos, que se encuentran en solución, mediante una interacción físicoquímica de dichos iones con ligandos que se encuentran presentes en la superficie celular de un biosorbente. Esta interacción se produce con grupos funcionales expuestos en el exterior celular pertenecientes a partes de moléculas componentes de las paredes celulares, como por ejemplo carboxilo, amino, hidroxilo, fosfato, sulfhidrido y polímeros naturales, llamados biopolímeros; las características funcionales de estas macromoléculas les confieren la capacidad de absorber bajo condiciones predeterminadas.

⁶ Research Journal Of Chemistry And Environment. Biosorption of Heavy Metals. 04/12/2003. En línea: <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/water/paper/biosorption/biosorption.htm>

En el proceso de biosorción se ven envueltas dos fases: una fase sólida (la matriz biológica, biosorbente o adsorbente), y una fase líquida, que normalmente es el agua, la que actúa como fase líquida y que contiene una especie disuelta, la misma que se pretende que sea retenida por el sorbente. Dado que existe una gran afinidad del biosorbente por el sorbato (la especie a ser adsorbida), éste último es atraído y sujetado a la matriz por diferentes mecanismos que los consideraremos más adelante, y este proceso continúa hasta que se logra establecer un equilibrio entre la cantidad del sorbato retenido y la porción restante en la solución.

Las macromoléculas que intervienen en la biosorción, los biopolímeros, son especies químicas de alto peso molecular, de gran tamaño y por lo general son de forma alargada, y forman parte de las paredes celulares vegetales principalmente, pero también de algunas estructuras animales. Estos son los principales responsables de la capacidad biosorbente de las biomasas; un biopolímero utilizado como adsorbente se denomina bioadsorbente. El biopolímero de origen vegetal contiene celulosa, de hecho este es el biopolímero más abundante en la naturaleza, y su unidad monomérica es la glucosa.

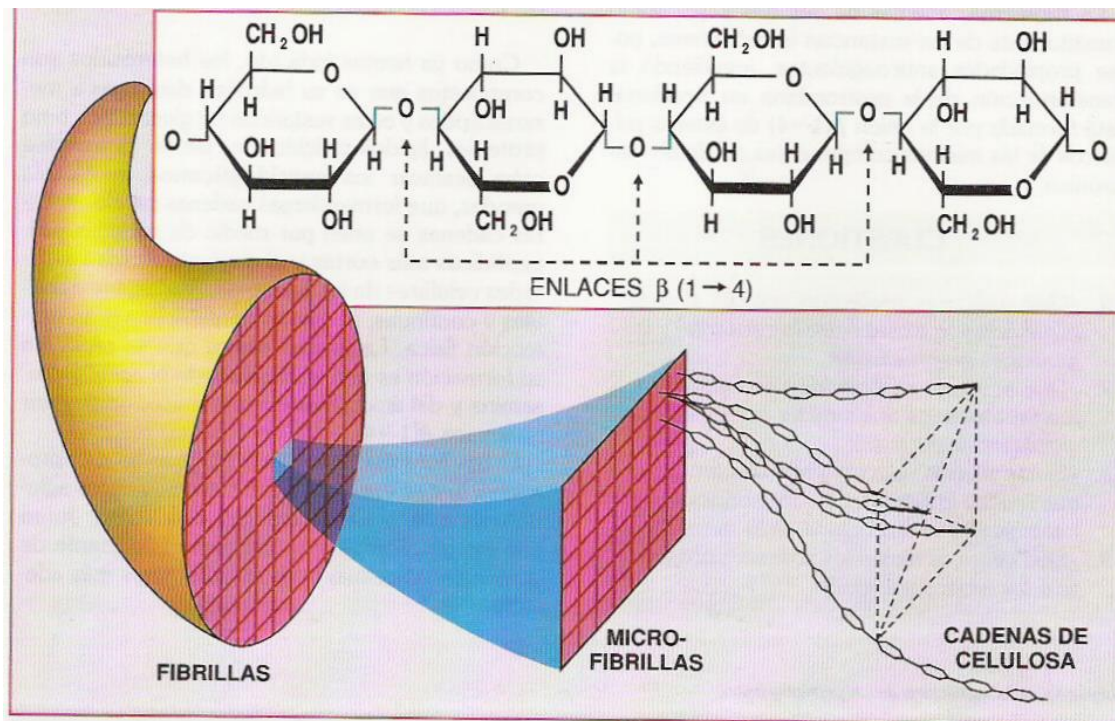


Figura 3. Fuente: <http://www.bionova.org.es/biocast/tema07.htm>. La Celulosa.

La biosorción en la celulosa se puede producir por quimiosorción, es decir, mediante un intercambio iónico, coordinación, quelatación; e involucra altas energías de enlace entre el adsorbente y la especie metálica; o también puede haber biosorción por fisisorción, la que se da mediante interacciones débiles de tipo dipolar, o por atrapamiento en tamices moleculares. En esta categoría, la adsorción física se lleva a cabo con la ayuda de las fuerzas de van der Waals.

Kuyucak y Volesky (1998), plantearon la hipótesis de que la biosorción de uranio, cadmio, zinc, cobre y cobalto mediante biomasa muerta de algas, hongos y levaduras se lleva a cabo a través de las interacciones electrostáticas entre los iones metálicos en solución y las paredes celulares de las células microbianas.

Sin embargo, la celulosa presenta la ventaja de que no necesita una fuente continua de nutrientes para mantener su capacidad de biosorción, como sí ocurre en los procesos de biosorción que se vale del metabolismo de los organismos vivos, también cabe acotar que con una matriz de biomasa muerta es más sencillo revertir el proceso de biosorción que con microorganismos vivos. La biosorción es, además, un mecanismo de cinética rápida que no presenta una alta dependencia con la temperatura y en muchos casos puede estudiarse en detalle mediante la construcción de los modelos de isotermas de Langmuir y Freundlich⁷.

II.B.1. Biosorción de metales pesados

Mediante la biosorción es posible concentrar metales pesados incluso en soluciones acuosas muy diluidas. La biomasa presenta esta propiedad como si fuera un intercambiador de iones de origen biológico. Como ya se ha dicho, la estructura de la pared celular es la responsable de este fenómeno.

⁷ QUIMICA VIVA. MICROORGANISMOS Y METALES PESADOS: UNA INTERACCIÓN EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE. 12/11/2003. En línea: <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/Actualizaciones/metales/metales.htm>

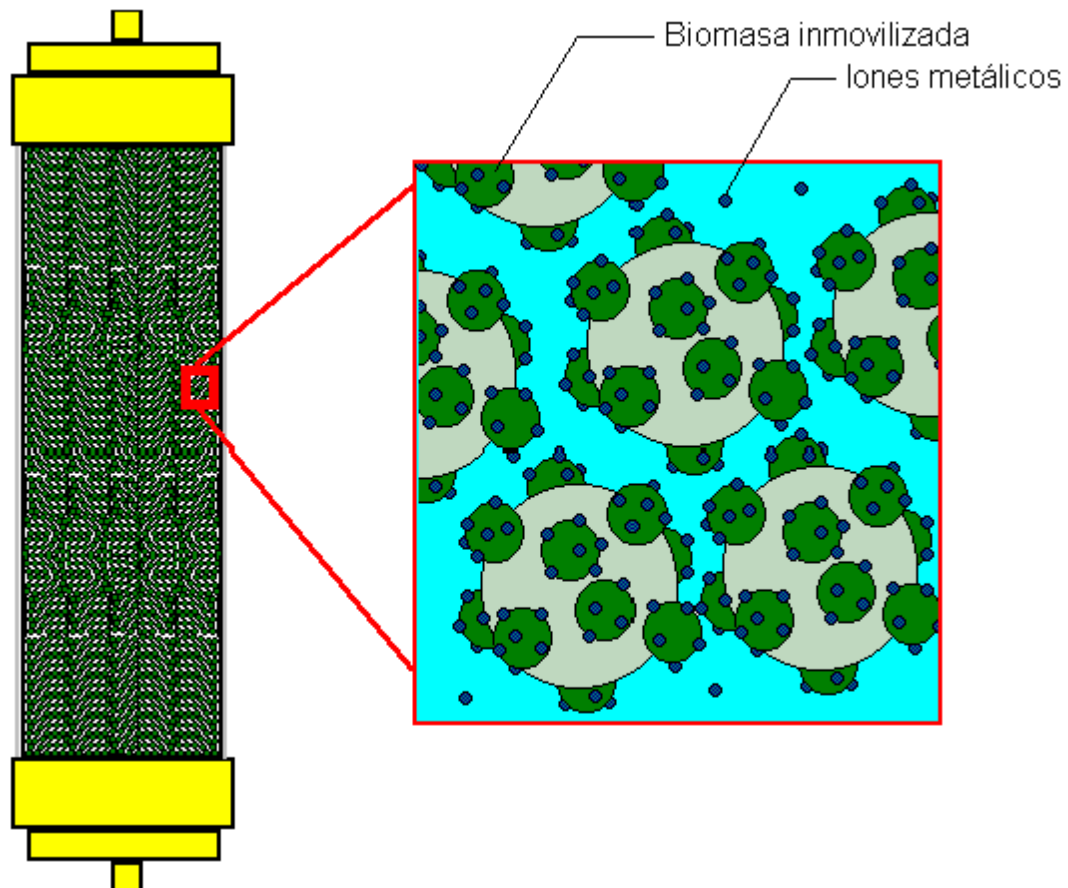


Figura 4. Fuente: <http://seia.guanajuato.gob.mx/editor/tmp/File/A60104.pdf>

Eliminación de metales en aguas naturales por biomateriales.

En las múltiples investigaciones sobre biosorción se ha revelado que las especies metálicas pueden ser depositadas en el biosorbente sólido a través de diferentes procesos de sorción, de intercambio iónico, complejación, quelación, microprecipitación, etc⁸. Puede producirse por ejemplo, una precipitación de los metales, la misma que puede ser dependiente del metabolismo celular o independiente de ella. En el primer caso, la remoción de metal de la solución se asocia a menudo con el sistema de defensa activo de los microorganismos, es decir, reaccionan en presencia de un metal tóxico y producen compuestos que favorecen el proceso de precipitación.

⁸MC GILL. WHAT IS BIOSORPTION. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://biosorption.mcgill.ca/whatis.htm>

En el caso de la precipitación que no depende del metabolismo celular, puede ser una consecuencia de la interacción química entre el metal y la superficie celular. Los diversos mecanismos de biosorción antes mencionados pueden tener lugar simultáneamente.



Figura 5. Fuente: <http://biosorption.mcgill.ca/BT/BTbrief.htm>.

Columnas de biosorción.

En la biosorción de metales pesados incluso se ha podido trabajar en la recuperación de dichos metales luego de purificar el agua contaminada, esta recuperación sólo es industrialmente rentable si el biosorbente es muy barato (como el caso de los residuos de celulosa), ya que con sorbentes convencionales el costo superaría el beneficio obtenido.

II.B.2. Efecto del pH en la biosorción

Al analizar los diferentes estudios de biosorción a nivel mundial, todo parece indicar que el pH es el parámetro más importante en el proceso de biosorción, ya que afecta a la química de las soluciones de los metales, la actividad de los grupos funcionales de la biomasa y la competencia de los iones metálicos. El mecanismo de biosorción a menudo envuelve reacciones químicas entre los grupos funcionales presentes en la superficie del

biosorbente y los iones metálicos. Esto implica, en la mayoría de los casos, la formación de complejos o reacciones de intercambio catiónico debido a alta capacidad de intercambio catiónico del biosorbente. El aumento de la capacidad de absorción se atribuye a los cambios en las propiedades de la superficie del sorbente y la naturaleza química de los iones cadmio. Si existe un bajo pH inicial de la solución, los grupos funcionales tienden a adquirir una carga neta positiva. A medida que aumenta el pH de la solución inicial, la disociación de los grupos funcionales superficiales empieza a ocurrir en la superficie de la matriz, haciendo que la superficie adquiera una atracción hacia la carga positiva de los iones⁹.

Algunos autores como Marques y Pinheiro (2000), realizaron estudios sobre los efectos del pH sobre la retención de Cu²⁺, Cd²⁺, y Pb²⁺ en soluciones acuosas utilizando una matriz de biomasa constituida por levadura residual de un proceso de elaboración de cerveza; compararon la eficiencia para remover metales usando una suspensión de biomasa sin lavar con respecto a la matriz de biomasa previamente incubada y lavada con agua destilada. En todos los experimentos realizados con biomasa sin lavar hubo un desplazamiento del pH del medio de 4.5 a 7-8 al final. Este incremento del pH fue el responsable directo del efecto de precipitación del metal, esto sumado al proceso de biosorción en sí.

Suh et al. (2000) y Suh y Kim (2000), también realizaron estudios sobre el efecto del pH en la acumulación de Pb²⁺ en *Saccharomyces cerevisiae* y *Aureobasidium pullulans*, llegando a la conclusión de que las condiciones de pH óptimo para la acumulación de Pb²⁺ en ambas especies fue dentro de los rangos de 4-5 y 6-7 respectivamente. Ferraz y Teixeira (1999), realizaron investigaciones similares en el uso de levadura de cervecería para extraer Cr(III) y Pb(II) de aguas residuales. En todos los casos se determinó que el pH es un factor determinante en los procesos de biosorción de metales pesados.

⁹ AGUSTÍN E. OFOMAJA, YUH-SHAN HOB. Effect of pH on cadmium biosorption by coconut copra meal. 16/06/2006. En línea: <http://asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/Publications/PDF/J%20Haz%20Mat139,%20356.pdf>

II.C. Estudio isotérmico de biosorción

Un estudio isotérmico de biosorción nos permite encontrar las condiciones óptimas para que se genere una biosorción de un determinado metal en solución utilizando un biosorbente específico. Este estudio, por lo general, se lo realiza en un laboratorio que cuente con las condiciones ambientales adecuadas así como los equipos y reactivos necesarios. Abarca la obtención y tratamiento del biosorbente como una fase previa, en la que la matriz vegetal es tratada por diferentes medios (sean estos físicos o químicos) de modo que se obtenga como resultado un sorbente con características uniformes adecuadas para el estudio en el laboratorio. Una vez que está listo el biosorbente, se debe realizar un estudio de pH óptimo, que como ya se ha dicho, es uno de los factores más determinantes en el proceso de biosorción. Hay que tener en cuenta que éste factor varía para cada metal. Una vez que se conoce el dato de pH óptimo, se debe realizar un estudio cinético de biosorción, en el que se determina el tiempo ideal de biosorción, es decir, nos indica el lapso óptimo de contacto entre la matriz y la solución que contiene el metal. Cuando se conoce el pH y el tiempo ideales de biosorción, se prosigue con las isothermas de biosorción, mismas que nos permiten conocer la cantidad máxima de metal que puede absorber el biosorbente. Esto último se lo puede determinar con la ayuda de los modelos isotérmicos de adsorción de Langmuir y Freundlich.

II.C.1 Isothermas de Langmuir

La isoterma de Langmuir, también conocida como ecuación de Langmuir, o ecuación de adsorción de Langmuir, es la igualdad que relaciona la adsorción que manifiestan determinadas moléculas cuando se encuentran en una superficie en estado sólido con las concentraciones, o presiones de gas del medio, que se sitúa sobre la superficie sólida anteriormente mencionada, todo ello a un temperatura constante.

La isoterma de Langmuir fue establecida por Irving Langmuir, un físico-químico estadounidense, al que se le otorgó el Premio Nobel de Química, en el año 1932, por sus valiosos descubrimientos e investigaciones en el campo de la química de superficies.

A las isothermas de adsorción en general, (entre ellas las isothermas de Langmuir), también se las conoce como isothermas de sorción, y son aquellas que representan un equilibrio de la adsorción en un material, cuando la temperatura del proceso es constante, representándose la cantidad de sorbato que ha logrado unirse a la superficie. Este tipo de isothermas se utilizan muy frecuentemente, en modelos de tipo experimental, consiguiéndose a partir de las medidas realizadas por procesos de análisis de regresión.

La igualdad de la isoterma de Langmuir es la siguiente:

$$\theta = \frac{\alpha \cdot P}{1 + \alpha \cdot P} \quad \text{Ecuación No. 1}$$

Donde θ , hace referencia a la fracción o espacio de superficie de cobertura en el proceso. P , es la presión del gas, o en otros casos, la concentración de este, y α , es una constante. La constante de adsorción α (alfa), es también llamada constante de adsorción de Langmuir, la cual incrementa a la vez que incrementa la energía de ligadura en la adsorción, siempre que la temperatura sea menor.

Al trabajar con isothermas de adsorción lo más común es adoptar una definición de la cobertura de la superficie (θ), que define la máxima cobertura (saturación) de la superficie de un adsorbato particular en una superficie dada siempre a la unidad, es decir, $\theta_{\max} = 1$. Esta manera de definir la cobertura de la superficie difiere de la que generalmente se adopta en la ciencia de superficies, donde la práctica más común es igualar θ con la relación entre las especies de adsorbato y los átomos de la superficie del sustrato (que conduce a la saturación de coberturas, que son casi siempre menor que la unidad).

Al desarrollar su modelo isotérmico, Langmuir considera que la superficie del sorbato es “geométrica y energéticamente homogénea, es decir que todos los sitios de adsorción

son equivalentes”¹⁰. Langmuir también considera que la adsorción de las moléculas está limitada a la formación de una monocapa estadística.

La ecuación de Langmuir puede ser representada en su forma linealizada y la representación gráfica de P/X en función de P, debe dar una línea recta, con pendiente igual a $(\frac{1}{X_m})$ y coeficiente de posición igual a $(\frac{1}{b \cdot X_m})$. Es posible optimizar la ecuación de Langmuir por la regresión lineal y métodos no lineales de la regresión.

Otra de las variantes de la isoterma de Langmuir muy utilizada en las industrias que trabajan con sorción es:

$$\frac{Y}{M} = \frac{abC}{1} + aC \quad \text{Ecuación No. 2}$$

Donde:

Y = concentración de contaminante absorbido, mg / L

M = concentración de sorbato, mg / L

C = concentración de equilibrio del contaminante, mg / L

a = constante (determina gráficamente)

b = constante (determinada gráficamente)

Posteriormente, la ecuación puede ser manipulada para llegar a forma lineal, como se muestra a continuación:

$$\frac{1}{Y/M} = \frac{1}{ab} * \frac{1}{C} + \frac{1}{b} \quad \text{Ecuación No. 3}$$

¹⁰ RAFAEL GARCÍA LOVERA, DEPARTAMENTO DE FÍSICO-QUÍMICA, FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. Caracterización Textural de Adsorbentes. Visto online: 27/06/2011. En línea: [http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cyted/publicaciones/cyted%20librotallerV/I.3%20Rafael%20Garcia\(PDF\).pdf](http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cyted/publicaciones/cyted%20librotallerV/I.3%20Rafael%20Garcia(PDF).pdf)

De esta ecuación por deducción algebraica se puede percibir que $\frac{1}{Y/M}$ (o simplemente $\frac{M}{Y}$) es el valor de y; además se ve que $\frac{1}{C}$ es el valor de x cuando se grafican. El valor de $\frac{1}{ab}$ es la pendiente y el valor de $\frac{1}{b}$ es la intersección. El propósito de dichos cálculos es determinar los valores de "a" y "b", ya que estos valores varían de tratamiento en tratamiento. Una vez que se conocen los valores de "a" y "b" se los introduce en la ecuación de isoterma de Langmuir, y esta ecuación obtenida nos sirve para calcular cualquier concentración de equilibrio deseado del contaminante o sorbato.

Hay muchos otros tipos de isotermas que difieren en uno o más de los supuestos realizados en la obtención de la expresión para la cobertura de la superficie, en particular, sobre cómo tratar la dependencia de la cobertura de la superficie de la entalpía de adsorción. La isoterma de Langmuir es una de las más sencillas para estudios de biosorción, y además proporciona información útil sobre la dependencia de la presión de la extensión de la superficie de adsorción como ya hemos visto.

II.C.2 Isotermas de Freundlich

En el año de 1909, Freundlich dió una expresión empírica que representa la variación isotérmica de adsorción de una cantidad de gas adsorbido por unidad de masa de adsorbente sólido con la presión. Esta ecuación se conoce como isoterma de adsorción de Freundlich o la ecuación de adsorción de Freundlich.

$$\frac{x}{m} = kP^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

Donde x es la masa del gas adsorbido en la masa m del adsorbente a la presión P y K, n son constantes cuyos valores dependen de adsorbente y el gas a una temperatura determinada. A baja presión, el grado de adsorción es directamente proporcional a la presión (elevada a una potencia).

$$\frac{x}{m} \propto P^1 \quad \text{Ecuación No. 5}$$

A alta presión, grado de adsorción es independiente de la presión (elevado a potencia cero).

$$\frac{x}{m} \propto P^0 \quad \text{Ecuación No. 6}$$

Por lo tanto su valor medio de la presión, la absorción es directamente proporcional al aumento de la presión a la potencia de $1/n$. Aquí n es una variable cuyo valor es mayor que uno.

$$\therefore \frac{x}{m} \propto P^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación No. 7}$$

Si a la ecuación se le añade una constante de proporcionalidad, k , también conocida como constante de adsorción queda de la siguiente manera:

$$\frac{x}{m} = kP^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ecuación No.8}$$

La ecuación anterior (igual a la Ecuación No.1) es la que se conoce como la ecuación de adsorción de Freundlich, y si aplicamos logaritmo a ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log k + \frac{1}{n} \log p \quad \text{Ecuación No. 9}$$

La ecuación anterior ecuación es comparable con la ecuación de la recta, $y = mx + c$, donde m representa la pendiente de la línea y c representa interceptar el eje y . Al realizar

una regresión lineal entre $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ y $\log p$, tendremos una línea recta con el valor de la pendiente igual a $\frac{1}{n}$ y $\log k$ como eje de intercepción.

Experimentalmente se ha determinado que el grado de absorción varía directamente con la presión hasta alcanzar un punto conocido como presión de saturación (Ps). Más allá de ese punto la tasa de absorción se satura incluso si después se aplica una presión más alta. De modo que la isoterma de adsorción de Freundlich no es efectiva a presiones más altas a las de dicho punto.

Capítulo III. Marco Metodológico.

III.A Materiales

Se empleó agitadores magnéticos, vasos de precipitación, cajas petri, tijeras, pipetas, balones aforados, imanes de agitación, equipo para Absorción Atómica modelo Varian, lámpara de cromo, lámpara de cadmio, soportes universales, pinzas, embudos, Papel filtro, tamices marca Fisher, molino industrial modelo Edible Pulp Milling DM-lup 150 II, estufa modelo memmert Schutzart DIN 40050-IP 20, autoclave modelo tuttner 3870 M.

III.B. Reactivos

Se utilizaron únicamente reactivos de grado analítico. Las soluciones de Cr y Cd fueron preparadas a partir de soluciones estándar certificadas de 1000 ppm. Para el ajuste del pH se preparó soluciones buffer, así como soluciones de NaOH 1M y HNO₃ 0,1 M y 10M.

III. C. Obtención Del Biosorbente

Se utilizó césped obtenido del jardín doméstico de la residencia del investigador, a la que se le sometió a secado en una estufa durante 15 días a una temperatura de 60° C. La muestra fue molida y tamizada hasta obtener un tamaño de partícula uniforme de aproximadamente 710 micrómetros, luego de lo cual se le aplicó a la matriz un

tratamiento mediante el uso de un autoclave a 121°C durante 15 minutos. El material obtenido se desecó a 60° C durante 3 días en una estufa. (LARENAS URÍA, 2008).

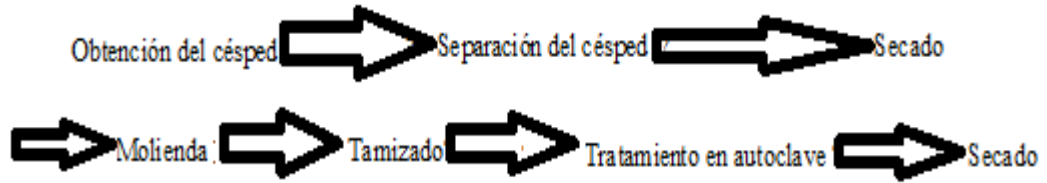


Diagrama 1. Obtención del biosorbente.



Figura 6. Fuente: El Autor, Secado de la matriz, 2010



Figura 7. Fuente: El Autor, Molienda de la matriz.



Figura 8. Fuente: El Autor, Tamizado de la matriz.

III. D. Efecto Del pH

Tomando en consideración las diferentes características de los metales así como su comportamiento particular ante un proceso de biosorción se adoptó criterios específicos para cada metal, realizándose los estudios de pH óptimo como se describe a continuación.

III. D. 1. Efecto del pH en la biosorción de cromo

Para determinar el efecto del pH en la biosorción de cromo se procedió de la siguiente manera:

En seis vasos de precipitación de 200ml se colocó 100ml de solución de 1,0ppm de cromo preparado a partir de un estándar certificado. A cada vaso se agregó 1g de biosorbente. Se ajustó el pH de las seis soluciones a 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0 y 8,0 respectivamente, utilizando para ello soluciones buffer de HNO_3 y NaOH 0,1M. Las soluciones se agitaron durante 2 horas luego de lo cual fueron filtradas, utilizándose la solución resultante para determinar la capacidad de biosorción de cromo en función del pH.

III. D. 2. Efecto del pH en la biosorción de cadmio

En el caso del cadmio se optó por preparar diez soluciones de 50ml con 3ppm de cadmio, dichas soluciones fueron preparadas a partir de un estándar certificado de cadmio y se colocaron en diez vasos de precipitación de 100 ml. A cada vaso se agregó 0,1g de biosorbente. Se ajustó el pH de las diez soluciones a 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,0; 11,0 y 12,0 respectivamente, utilizando para ello soluciones buffer de HNO_3 y NaOH 0,1M. Las soluciones se agitaron durante 2 horas luego de lo cual fueron filtradas, utilizándose la solución resultante para determinar la capacidad de biosorción de cadmio en función del pH.

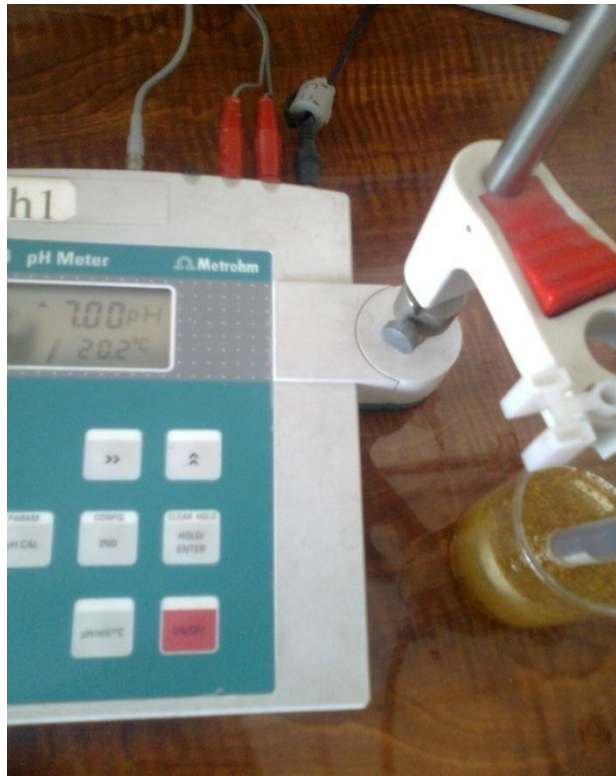


Figura 9. Fuente: El Autor, Ajuste de pH

III.E. Cinéticas De Biosorción

En el estudio de cinéticas de biosorción se adoptó medidas particulares para cada metal, teniendo en cuenta que el pH óptimo difiere para cada caso.

III.E.1. Cinéticas De Biosorción De Cromo

Las cinéticas de biosorción de cromo se determinó colocando en vasos de precipitación 50 ml soluciones de 50, 70, 100 y 500 ppm. A cada solución se agregó 0,1 g de biosorbente y a dichas soluciones se las ajustó a pH4 (pH óptimo obtenido para cromo) utilizando una solución buffer de NaOH 10M. Las soluciones se mantuvieron en agitación a 200rpm durante 1, 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos. Cumplidos los tiempos respectivos, las soluciones fueron filtradas y el resultante fue analizado para determinar la concentración de metal y con ello determinar el tiempo óptimo de biosorción de cromo.

III. E. 2. Cinéticas de biosorción de cadmio

Las cinéticas de biosorción de cadmio se determinó colocando en vasos de precipitación 50 ml soluciones de 50, 70, 100 y 500 ppm. A cada solución se agregó 0,1 g de biosorbente y a dichas soluciones se las ajustó a pH8 (pH óptimo determinado para cadmio) utilizando una solución buffer de NaOH 5M. Las soluciones se mantuvieron en agitación a 200rpm durante 1, 5, 10, 15, 30, 60, 90 y 120 minutos. Cumplidos los tiempos respectivos, las soluciones fueron filtradas y el resultante fue analizado para determinar la concentración de cadmio y con ello determinar el tiempo óptimo de biosorción para dicho metal.

III.F. Isotermas De Biosorción

Para este estudio se consideró la utilización de los modelos isotérmicos de Langmuir y de Freundlich. Al igual que en los estudios anteriores se adoptó medidas particulares para cada metal, teniendo en cuenta sus características óptimas de pH y tiempo de biosorción.

III.F.1. Isotermas De Biosorción de Cromo

En este caso la metodología consistió en colocar en vasos de precipitación 50 ml de soluciones de 50, 500, 700, 1000 y 2000 ppm de cromo. A cada solución se agregó 0,1 g de biosorbente, se ajustó a pH4 utilizando una solución buffer de NaOH 10M y se mantuvo en agitación durante 30 minutos. Posteriormente las soluciones fueron filtradas y la solución resultante se utilizó para evaluar la capacidad máxima de retención ($q_{máx}$) de cromo.

III.F.2. Isotermas De Biosorción de Cadmio

De igual manera para el cadmio se colocó en vasos de precipitación 50 ml de soluciones de 50, 500, 700, 1000 y 2000 ppm de cadmio. A cada solución se agregó 0,1 g de biosorbente, se ajustó a pH8 utilizando una solución buffer de NaOH 5M y se mantuvo en agitación durante 30 minutos. Posteriormente las soluciones fueron filtradas y la solución resultante se utilizó para evaluar la capacidad máxima de retención ($q_{máx}$) de cadmio.



Figura 10. Fuente: El Autor, Isotermas de Biosorción

Capítulo IV. Discusión De Resultados.

En los diferentes estudios de biosorción de cromo y cadmio (algunos de los cuales se recogen en la bibliografía) se han determinado diferentes valores óptimos de pH, tiempo de contacto y concentración del metal, esto se debe al uso de diferentes matrices para la biosorción, particularmente entre quienes han utilizado matrices vivas (como microorganismos por ejemplo), en contraste con el presente trabajo que emplea una matriz de césped tratada físicamente, y que presenta sus propias condiciones óptimas de biosorción, sentando así un precedente para futuras investigaciones que empleen dicha matriz como biosorbente.

IV.A. Efecto del pH en la biosorción de cromo

En cuanto al pH, como se observa en el gráfico 1, el pH óptimo para la retención de cromo fue de 4,0. En valores superiores e inferiores a los de pH óptimo se aprecia una disminución progresiva de la biosorción.

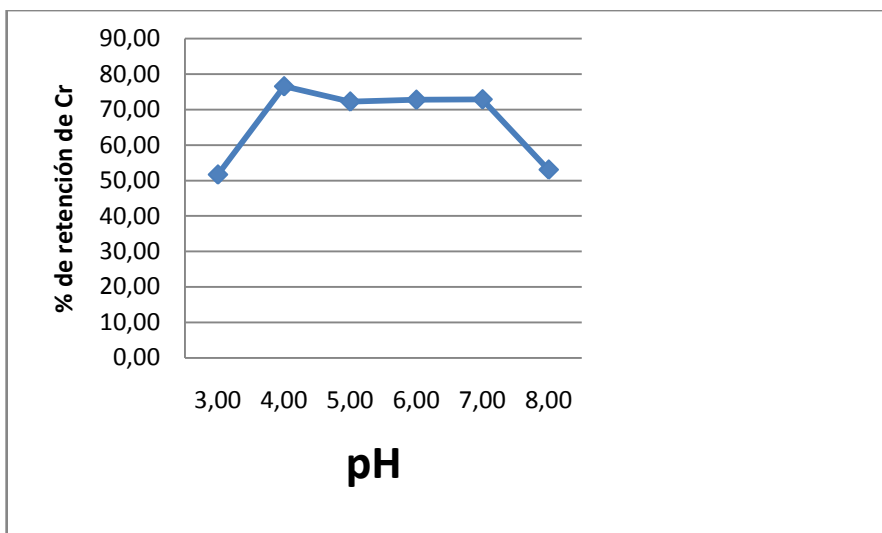


Gráfico 1. Efecto del pH sobre la biosorción de Cromo

Se puede deducir que en el caso del cromo, el biosorbente presenta un comportamiento óptimo cuando la solución tiene un pH de 4,0; sin embargo en pH de 5,0; 6,0; y 7,0 todavía manifiesta una retención muy buena del metal.

IV.B. Efecto del pH en la biosorción de cadmio

En el gráfico 2 se puede ver que el pH óptimo para la biosorción de cadmio fue de 8,0. En valores superiores e inferiores a los de pH óptimo se aprecia una disminución progresiva de la biosorción.

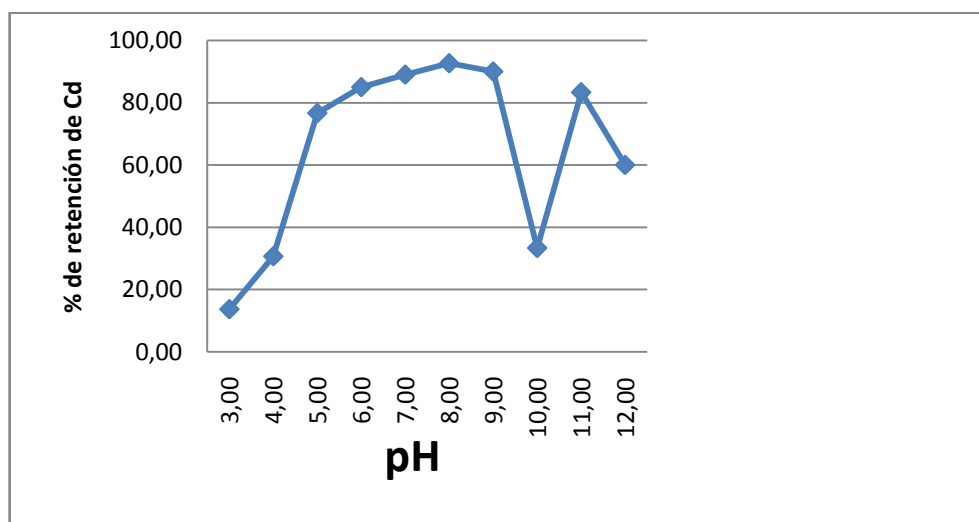


Gráfico 2. Efecto del pH sobre la biosorción de Cadmio.

El comportamiento del cadmio desprende que el pH óptimo es igual a 8,0; siendo significativo todavía el nivel de biosorción en pH 9,0.

IV.C. Cinéticas de biosorción de cromo

A las soluciones se las ajustó a pH4 (pH óptimo) utilizando una solución buffer de NaOH 10M. En el gráfico 3 se observa que la máxima biosorción de cromo se produce entre 1 y 5 minutos para las soluciones más concentradas, mientras que para la más diluida el tiempo óptimo fue de 60 minutos.

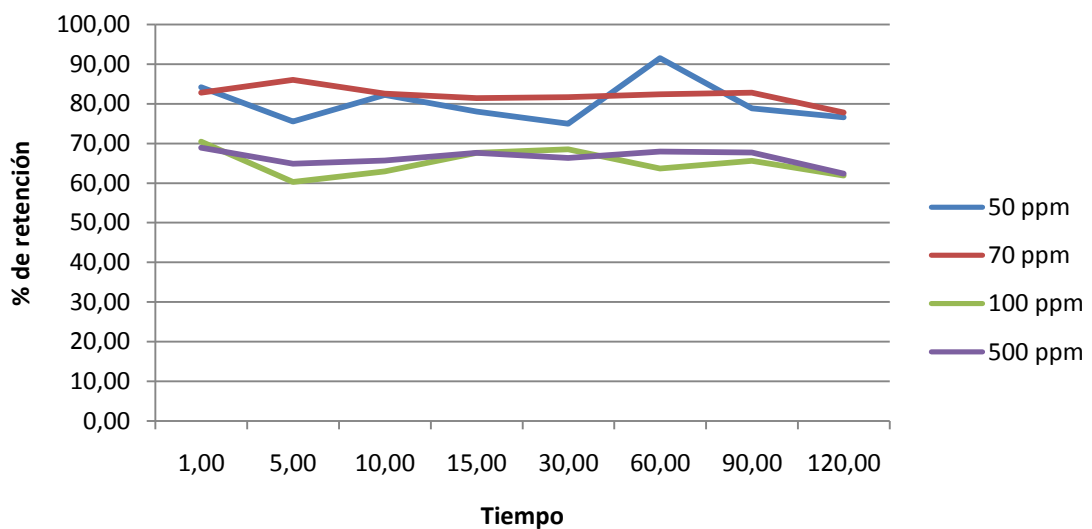


Gráfico 3. Cinética de biosorción de cromo. Tiempo vs. Porcentaje de retención.

IV.D. Cinéticas de biosorción de cadmio

Para cadmio, a cada solución se la ajustó a pH8 (pH óptimo) utilizando una solución buffer de NaOH 5M. En el gráfico 4 se muestra que para las soluciones más concentradas el tiempo óptimo es de 30 minutos, y en el caso de las más diluidas el tiempo óptimo de biosorción va entre 5 y 15 minutos.

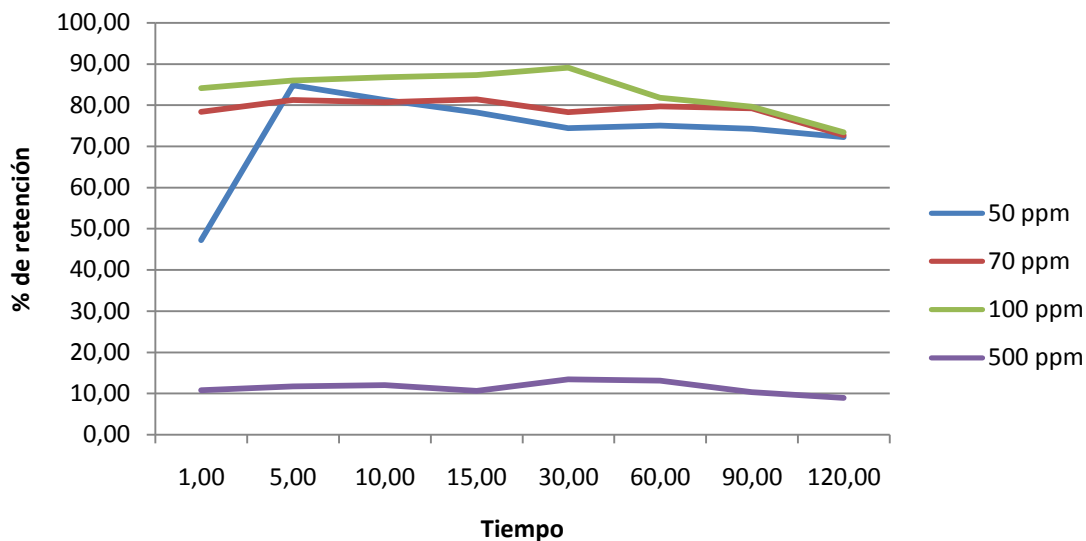


Gráfico 4. Cinética de biosorción de cadmio. Tiempo vs. Porcentaje de retención.

IV.E. Isotermas

Los cálculos se realizaron tomando en cuenta las siguientes relaciones:

$$q = ((C_i - C_e) * V) / X_o \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

q = Tasa de biosorción del metal (mg/g de metal por gramo de biosorbente)

C_i = Concentración inicial del metal en solución (mg/l)

C_e = Concentración final del metal (en equilibrio) en solución (mg/l)

X_o = Cantidad de biosorbente agregada (g)

V = Volumen de solución (l)

Para la isoterma de Langmuir se linealizó la ecuación graficando $1/q$ vs. $1/C_e$ obteniéndose la siguiente relación:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_{m\acute{a}x}} + \frac{1}{b \cdot q_{m\acute{a}x} \cdot C_e} \quad (\text{Ecuaci3n 11})$$

Donde:

$q_{m\acute{a}x}$ = Tasa máxima de retenci3n del metal (mg de metal/g biosorbente)

b = constante relacionada con la afinidad del biosorbente por los iones del metal

Para la isoterma de Freundlich se utiliza la ecuaci3n:

$$\log q = \frac{1}{n} \log C_e + \log K \quad (\text{Ecuaci3n 12})$$

Donde:

n = Constante relacionada con la intensidad de sorci3n del biosorbente en funci3n de su grado de heterogeneidad.

K = Constante de Freundlich relacionada a la capacidad de sorci3n del biosorbente.

IV.E.1. Isotermas de biosorci3n de cromo

De acuerdo a los modelos de Langmuir expuestos en el gráfico 5, se puede calcular la ordenada al origen $1/q_{m\acute{a}x}$ y la pendiente $1/b \cdot q_{m\acute{a}x}$ con lo cual $q_{m\acute{a}x}$ resultante es igual a 1250mg de Cromo/g biosorbente. En dicho gráfico se aprecia que los datos se ajustan en un 99,98% al modelo propuesto.

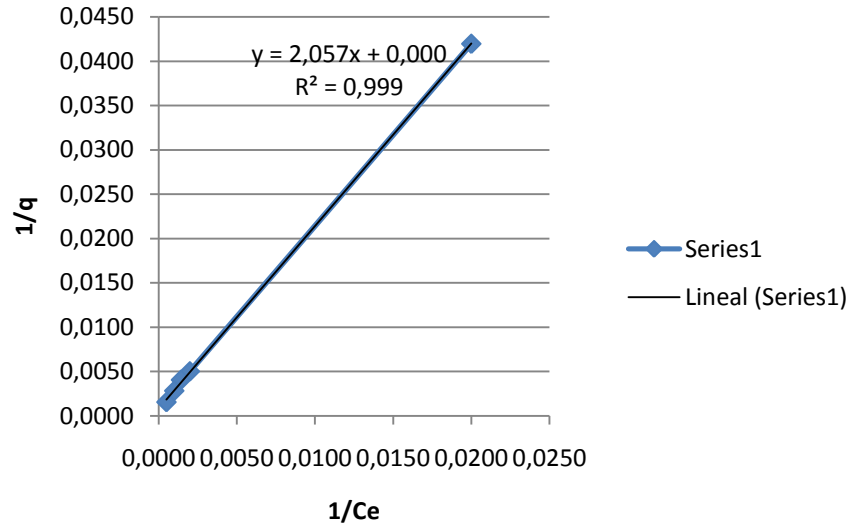


Gráfico 5. Isoterma de Langmuir para Cromo.

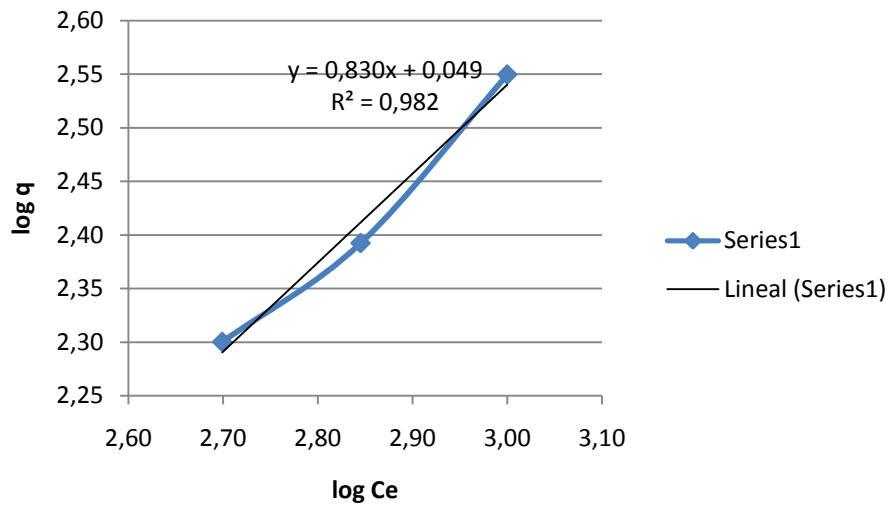


Gráfico 6. Isoterma de Freundlich para cromo.

Para el modelo de Freundlich la ecuación (3) se presenta en el gráfico 6, y nos permite calcular para cromo: $K = 1,12$ y $n = 1,20$, con lo que queda demostrado existe una afinidad significativa del biosorbente hacia el metal, así como una fuerza de adsorción intensa del cromo por la matriz de adsorción. Se puede apreciar que los resultados se ajustan en un 98,25% a la isoterma propuesta.

IV.E.2. Isotermas de biosorción de cadmio

En el caso del cadmio, en base a los modelos de Langmuir, se logra calcular la ordenada al origen $1/q_{\text{máx}}$ y la pendiente $1/b \cdot q_{\text{máx}}$ con lo cual $q_{\text{máx}}$ resultante es igual a 1428,57mg de Cadmio/g de biosorbente, tal como se aprecia en el gráfico 7, donde se aprecia que los datos se ajustan en un 99,99% al modelo propuesto.

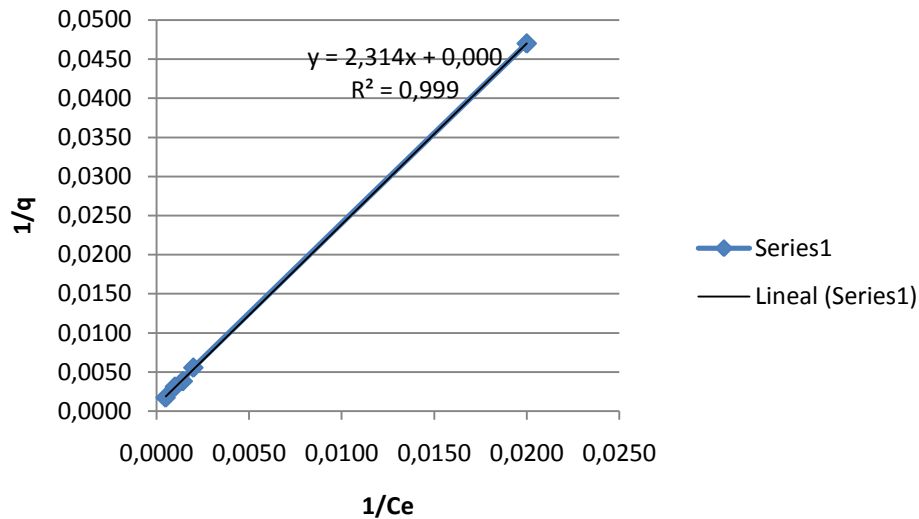


Gráfico 7. Isoterma de Langmuir para Cadmio.

Y para el modelo de Freundlich la ecuación (3) nos permite calcular para cadmio $K = 1,19$ y $n = 1,23$, con lo que se demuestra que para cadmio también existe una afinidad significativa del biosorbente hacia el metal, así como una fuerza de adsorción intensa de cadmio por la matriz de adsorción, esto se puede apreciar en el gráfico 8, en el que se observa que los resultados se ajustan en un 99,17% a la isoterma propuesta.

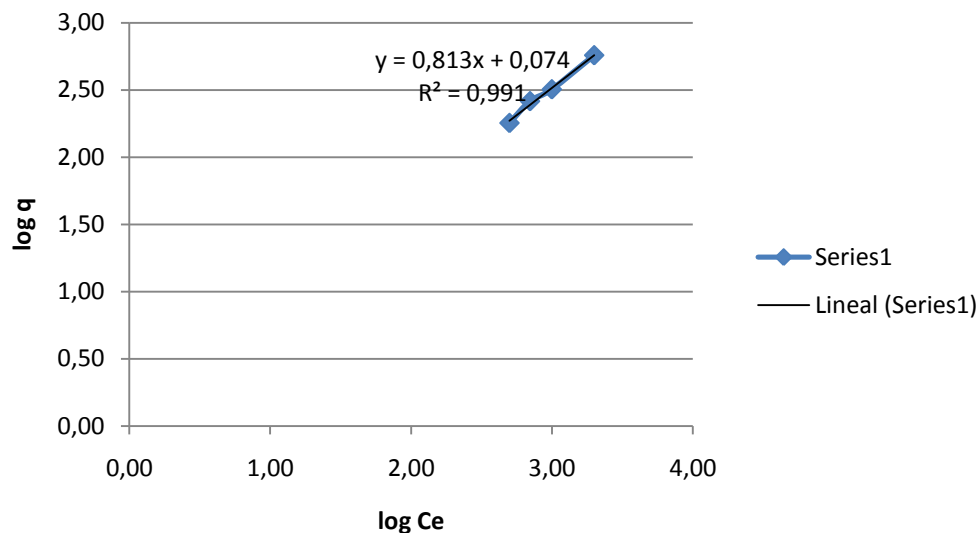


Gráfico 8. Isoterma de Freundlich para cadmio.

Para cromo, en 50ppm de solución, se produce una mayor cantidad de metal retenido a los 60 minutos de contacto del biosorbente con el metal, en concentraciones superiores a los 100ppm el tiempo es de 1 minuto. En lo que se refiere al cadmio, en las soluciones más concentradas (50 y 70 ppm), el tiempo óptimo está comprendido entre 5 y 15 minutos, pero en las concentraciones superiores a 100ppm el tiempo óptimo es de 30 minutos.

En los estudios de isotermas de biosorción mediante los modelos de Langmuir y Freundlich, para ambos metales se obtuvo que los modelos se ajustan idealmente para describir las isotermas de biosorción del sistema (todos los modelos presentan un valor de R² superior a 0,98), además se desprende unos valores de q_{máx} resultante igual a 1250mg de Cromo/g biosorbente y 1428,57mg de Cadmio/g de biosorbente, los cuales son alentadoramente altos.

Capítulo V. Conclusiones y Recomendaciones.

El biosorbente elaborado a base de una matriz de celulosa obtenida del césped (*Pennisetum clandestinum*) y posteriormente modificada mediante procesos físicos tiene la capacidad de biosorción de cromo y cadmio en solución, bajo las condiciones especificadas en el presente estudio. El efecto del pH es sin duda el factor más determinante en la capacidad de biosorción de la matriz. El tiempo de contacto y la concentración del metal influyen también considerablemente en el proceso de biosorción.

El pH óptimo de biosorción fue de 4,0 en el caso del cromo y de 8,0 para el cadmio. El tiempo de contacto para una biosorción óptima fue de 60 minutos para cromo y 30 minutos para cadmio.

En cuanto a la concentración del metal en capacidad de biosorción de la matriz se obtuvo una retención máxima de 1250mg de cromo por cada gramo de biosorbente, y 1428,57mg de cadmio por cada gramo de biosorbente.

Para un estudio de biosorción (como el presente), es fundamental que el tratamiento y la obtención de la matriz sorbente no conlleven costos superiores (costo energético, recursos, etc.) a las del posible beneficio de remediación ambiental, de otro modo, la aplicación práctica de los resultados obtenidos en el estudio no sería viable ni rentable.

Es muy importante que la matriz se encuentre lo más limpia posible, y en la medida de lo viable, debería provenir de lugares alejados de efluentes contaminantes. Se puede realizar una separación y clasificación de la materia prima recibida para asegurarnos de que no se mezclen materiales extraños con el césped.

Como vemos, el biosorbente utilizado es efectivo para la biosorción de cromo y cadmio bajo las condiciones indicadas en el presente artículo y ha presentado excelentes resultados al trabajar con metales como plomo en investigaciones anteriores (LARENAS URÍA, 2008), por lo que sigue siendo recomendable emprender investigaciones sobre la

capacidad de biosorción de la matriz en contacto con soluciones de otros metales pesados que contaminan aguas industriales y ambientales.

Además de estudios con otros metales sería recomendable realizar un estudio que involucre una solución acuosa que contenga diferentes contaminantes (por ejemplo plomo, cromo y cadmio) simultáneamente, y de este modo determinar la capacidad de biosorción de la matriz en presencia de aguas contaminadas con diferentes metales, así se podría determinar el porcentaje de retención para cada metal en particular, si alguno prevalece sobre los demás o si existe algún tipo de competencia al ser retenidos por la matriz vegetal.

Bibliografía

AE Ofomaja, Y.S. Ho, *Journal of Hazardous Materials*. B139 (2007) 356–362 Ho / Diario de B139 de Materiales Peligrosos, p. 356-362, 2007

CONABIO, *Pennisetum clandestinum* Hochst. ex Chiov. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/poaceae/pennisetum-clandestinum/fichas/ficha.htm>

COORDINADORA NACIONAL POR LA DEFENSA DE LA VIDA Y LA SOBERANÍA, Minería provoca alarmante contaminación en ríos de Tenguel. 24/04/2008 En línea: <http://www.noalamina.org/mineria-latinoamerica/mineria-ecuador/ecuador-mineria-provoca-alarmando-contaminacion-rios-tenguel>

DONG Gu J., K. H., Mechanism of hexavalent chromium detoxification by microorganisms and bioremediation application potential: A review., 2006.

EDIN, Césped kikuyo. 2000. En línea: http://www.edin.com.ar/cesped_kikuyo_panes_tepes_alfombras_semillas_fertilizacion.htm

FERRAZ, A.I. y TEIXEIRA J.A., The use of flocculating brewer's yeast for Cr(III) and Pb(II) removal from residual wastewaters. *Bioprocess Engineering*, p. 21, 431-437, 1999.

FIELD Jim, Bioremediación de metales pesados. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://binational.pharmacy.arizona.edu/documents/Bioremed-HM-es-JAF.pdf>

OROZCO Ferro, A M., Contreras, E. M., Bertola, N. C., Zaritzky, N. E., Hexavalent chromium removal using aerobic activated sludge batch systems added with powdered activated carbon. *Water SA* Vol. 33, No. 2, Abril, 2007.

GANESH, D., Monitoring of the early molecular resistance responses of coffee (*Coffea arabica* L.) to the rust fungus (*Hemileia vastatrix*) using real-time quantitative RT-PCR., *Lant Science*, 170, p. 1045–1051, 2006.

IGWE, J. C., ABIA, A., A bioseparation process for removing heavy metals from waste water using biosorbents. *African Journal of Biotechnology* ,Vol. 5, No. 12, , p. 1167-1179, Junio, 2006

IMAGENES FOTOS, Fotos de Quito. 18/04/2009. En línea:
<http://imagenesfotos.com/fotos-de-quito/>

KAIKAKE K., HOAKI, K., SUNADA, H., DHAKAL, R. P., BABA, Y., Removal characteristics of metal ions using degreased coffee beans: Adsorption equilibrium of cadmium(II). *Bioresource Technology*, 98, 2007.

KUYUCAK N, VOLESKY B, Biosorbents for recovery of metals from industrial solutions. *Biotechnol Lett* 10 p.137-142, 1998.

LA GUIA 2000, Ecuación de Langmuir. Visto online: 27/06/2011. En línea:
<http://quimica.laguia2000.com/ecuaciones-quimicas/ecuacion-de-langmuir>

LEBEAU, T., BAGOT, D., JÉZÉQUEL, K. y FABRE, B., Cadmium biosorption by free and immobilised microorganisms cultivated in a liquid soil extract medium: effects of Cd, pH and techniques of culture. *The Science of the Total Environment* 291 p.73-83, 2002.

MARQUES, M.F., PINHEIRO H.M, pH effects on the removal of Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ from aqueous solution by waste brewery biomass. *Bioprocess Eng.* p.23, 135-141, 2000.

MC GILL, WHAT IS BIOSORPTION. Visto online: 27/06/2011. En línea:
<http://biosorption.mcgill.ca/whatis.htm>

NATIONAL WEEDS STRATEGY, Kikuyu grass. Visto online: 27/06/2011 En línea:
<http://www.weeds.org.au/cgi-bin/weedident.cgi?tpl=plant.tpl&ibra=all&card=E27>

OFOMAJA Agustín E., YUH-SHAN HOB, Effect of pH on cadmium biosorption by coconut copra meal. 16/06/2006. En línea: <http://asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/Publications/PDF/J%20Haz%20Mat139,%20356.pdf>

OPEPA, Kikuyo. 2011. En Línea:
http://www.opepa.org/index.php?option=com_content&task=view&id=242&Itemid=30

ORAL, R., MERIÇB, S., DE NICOLAC, E., PETRUZZELLID, D., ROCCAB, C. D., PAGANOC, G., A multi-species toxicity evaluation of a chromium-based leather tannery wastewater. *Desalination*, 211, p. 48–57, 2007.

QMUL, The Langmuir Isotherm. Visto online: 27/06/2011. En línea:
http://www.chem.qmul.ac.uk/surfaces/scc/scat3_5.htm

QUIMICA VIVA, MICROORGANISMOS Y METALES PESADOS: UNA INTERACCIÓN EN BENEFICIO DEL MEDIO AMBIENTE. 12/11/2003. En línea:
<http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/Actualizaciones/metales/metales.htm>

RENSSELAER, Adsorption. Visto online: 27/06/2011. En línea:
<http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/Adsorb/equation.htm>

Research Journal Of Chemistry And Environment, Biosorption of Heavy Metals. 04/12/2003. En línea:
<http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/water/paper/biosorption/biosorption.htm>

RAFAEL GARCÍA LOVERA, DEPARTAMENTO DE FÍSICO-QUÍMICA, FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN, Caracterización Textural de Adsorbentes. Visto online: 27/06/2011. En línea: [http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cyted/publicaciones/cyted%20librotallerV/I.3%20Rafael%20Garcia\(PDF\).pdf](http://www.ua.es/grupo/lma/web%20cyted/publicaciones/cyted%20librotallerV/I.3%20Rafael%20Garcia(PDF).pdf)

REVISTA DEL INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE GEOLOGÍA, MINAS, METALURGIA Y CIENCIAS GEOGRÁFICAS, Bioremediación de metales tóxicos en efluentes mineros aplicando biosorción. Visto online: 27/06/2011. En línea: http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v04_n7/biore_metal.htm

SINGANAN, M., ABEBAW A., SINGANAN, V., Studies on the removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by using biomaterials., EJEAFChe, Vol. 6 No. 11, p. 2557-2564, 2007.

SUH, J.H., KIM, D.S., Effects of Hg²⁺ and cell conditions on Pb²⁺ accumulation by *Saccharomyces cerevisiae*. Bioprocess Eng.: 23, p.327-329, 2000.

SUH, J.H., YUN, J.W., Kim, D.S.; Comparison of Pb²⁺ accumulation characteristics between live and dead cells of *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans*. Biotechnol. Lett.: 20, p.247-251, 1998.

TANGAROMSUK, J., POKETHITIYOOK, P., KRUATRACHUE, M., UPATHAM, E.S., Cadmium biosorption by *Sphingomonas paucimobilis* biomass. Bioresource Technology 85: 103-105, 2002.

TSEZOS, M., Adsorption by Microbial Biomass as a Process for Removal of Ions from Process of Waste Solutions. en Immobilization of Ions by Biosorption, Eccles, H. and S. Hunt (Eds.), p.201-218, 1986.

USDA, Pennisetum clandestinum Hochst. ex Chiov. Kikuyugrass. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://plants.usda.gov/java/profile?symbol=PECL2>

VCCS, Langmuir Isotherm. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://water.me.vccs.edu/math/langmuir.html>

VOLESKY, B., Detoxification of metal-bearing effluents: biosorption for the next century., *idrometallurgy*, No. 59, p. 203-216, 2001.

VOLESKY, B., HOLAN Z. R., Biosorption of Heavy Metals., *Biotechnol. Prog.*, 11, p.235-250, 1995.

WANG, J., CHEN C., Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A review. *Biotechnology Advances*: 24, p.427-451, 2006.

XAMPLIFIED, Freundlich Adsorption Isotherm. Visto online: 27/06/2011. En línea: <http://www.xamplified.com/freundlich-adsorption-isotherm/>

XU, Y-B., XIAO, H-H., SUN, S-Y., Study on anaerobic treatment of wastewater containing hexavalent chromium., *J Zhejiang Univ SCI*, 2005.

XU, H., YUK, Sh. W., MING, H. W., NORA FUNG, Y. T., Biosorption and bioreduction of Cr(VI) by a microalgal isolate, *Chlorella miniata*., *Journal of Hazardous Materials*, 146, 2007.