



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

**Facultad de Química-Farmacia.
Departamento de Ingeniería Química.**

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: *“Modelación matemática del proceso de biosorción de Cromo⁺⁶ y Ni⁺²: estudios en serie en columnas de lecho fijo con Bagazo de Caña de Azúcar.”*

Autor: Nabin Kumar Karna

Tutores: Dr. C. Iván L. Rodríguez Rico
Dra. C. Inés Alomá Vicente

“Año del 54 Aniversario de la Revolución”

Santa Clara, 2013

PENSAMIENTO

Fíjese bien. No lo digo con espíritu de desprecio, pero fíjese bien. Estamos hecho de un material blando y flojo, sin resistencia, dependiendo para la energía, la oxidación ineficiente del material orgánico. Pasamos periódicamente a un estado de coma, y la menor variación de temperatura, presión atmosférica, la humedad o la intensidad de radiación afecta nuestra eficiencia. ¡Somos alterables!

DEDICATORIA

Dedico esta tesis

A mis madres, Kiran Devi Karna y Gretel Villanueva Ramos.
A Kiran por darme la vida y a Gretel por enseñarme vivir.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco

A la Revolución Cubana.

A mis padres y hermanas por su apoyo, cariño y constante preocupación hacia mí durante todos estos años, facilitando así que hoy se haga realidad este sueño.

A Andrés, Gretel, Aixa, Abel, Antonio y Héctor por ser parte de mi familia

A Gabriela, por estar a mi lado en ¡las malas y las peores!

A mis tutores Dr. Iván y Dra. Inés por apoyarme para hacer este trabajo sin ayuda de los cuales este trabajo no fuera posible.

A Dra. Irenia y Margarita por el cariño que me han brindado durante todo este tiempo en Cuba.

A Luis Romero y Amelita, de DAEE, por ayudarme en todo cuando los he necesitado.

Al compañero Mollineda que tanto me ayudó y me apoyó en los momentos más difíciles, en los análisis de laboratorio.

A Don Omar y Cachita por su cariño y apoyo.

A Anita, por ayudarme en el laboratorio y brindarme una amistad incondicional.

A los compañeros de mi clase por ayudarme en todo.

A Darién por ser un amigo fiel.

A todos los que me soportaron durante estos años.

RESUMEN

RESUMEN

En el trabajo que se presenta se evalúa la eficiencia de remoción de Ni^{+2} y Cr^{+6} utilizando bagazo natural como un novedoso biosorbente. Se realizaron estudios en lechos fijos en serie usando diferentes modelos matemáticos como Bohart-Adams, Thomas, Yoon y Nelson y Dosis- Respuesta para describir la curva de ruptura del proceso de adsorción de los iones Ni^{+2} y Cr^{+6} , mediante la programación en MATLAB R2007a. Se determina la factibilidad técnica y económica de la utilización del bagazo para el propósito deseado, ya que la eliminación de los metales se corresponde con la requerida para ser vertidos a cuerpos receptores de acuerdo a la norma cubana. Se demuestra mediante la modelación del proceso que los parámetros calculados teóricamente se aproximan a los experimentales en el punto de saturación. El modelo de Yoon y Nelson y Thomas reproducen satisfactoriamente la curva de ruptura, sin embargo de los modelos examinados, el modelo de Dosis - Respuesta es el que tiene un mejor ajuste para la simulación de la curva de ruptura.

Palabras claves: Bagazo de Caña de azúcar, biosorción, modelacion, curva de ruptura.

ABSTRACT

ABSTRACT

The work being presented aims to evaluate the efficiency of removal of Ni^{+2} and Cr^{+6} on natural sugarcane bagasse as a new biosorbent. The fixed bed studies using different mathematical models like Bohart-Adams, Thomas, Dose-answer model and Yoon and Nelson, to describe the breakthrough curve of the Ni^{+2} and Cr^{+6} solutions has been reported using MATLAB R2007a. The technical and economical feasibility of the bagasse for the desired purpose has been determined, as the elimination of the studies metals corresponds with the required parameters to be disposed off to the receptor bodies according to the cuban norm. The theoretically calculated parameters have shown close resemblance with those of the experiments at the exhaustion point. The Yoon and Nelson and Thomas models have shown excellent fit for all the examined range of breakthrough curves, however, among all the models examined the Dose and Answer model was found to be the most suitable one for simulation of the breakthrough curve of the heavy metal ions uptake on bed of the natural bagasse.

Keywords: Sugarcane bagasse, biosorption, modelation, breakthrough curve,

Tabla de contenido

<i>A mis padres y hermanas por su apoyo, cariño y constante preocupación hacia mí durante todos estos años, facilitando así que hoy se haga realidad este sueño.</i>	7
CAPITULO I.....	20
CAPITULO I.....	21
1. Revisión Bibliográfica	21
1.1. Contaminación ambiental por metales pesados.....	21
1.2. Metales pesados: Características y comportamiento	21
1.3 Impacto del Cromo a los seres vivos	22
1.4. Impacto del Níquel a los seres vivos.....	23
1.5- Tratamientos tradicionales a residuales con metales pesados.	23
1.5.1 Tratamiento físico-químico.....	24
1.5.2 Tratamientos de oxidación-reducción	24
1.5.3 Lixiviación	25
1.5.4 Intercambio de Iones.....	26
1.5.5 Ósmosis Inversa	26
1.5.6 Electrodialisis	26
1.5.7 Otros sistemas.....	27
1.6- Biosorción, alternativa novedosa para remover metales pesados en residuales industriales.	27
1.6.1 Mecanismos de biosorción.....	27
1.7 Diseño de columnas de lechos empacados.....	28
1.7.1 Biomásas utilizadas como material biosorbente.	28
1.7.2 Modelado de columnas de lecho fijo.....	29
1.7.2.1 Modelo de Bohart y Adams:	33
1.7.2.2 Modelo de Yoon y Nelson:	33
1.7.2.3 Modelo de Thomas.....	34
1.7.2.4 Modelo de Dosis Respuesta	34
1.8 Criterios de escalado.	35
1.8.1 Procedimiento a seguir:.....	36
1.8.2 Caída de presión:.....	37
1.9 Conclusiones parciales.....	37
CAPITULO II.....	39

<i>Montaje a escala de laboratorio de un sistema de columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.</i>	40
2.1- <i>Montaje experimental</i>	40
2.1.1. <i>Preparación del biosorbente.</i>	40
2.1.2. <i>Preparación de las soluciones.</i>	40
2.1.3. <i>Influencia del pH en el proceso de biosorción continuo.</i>	41
2.1.4 <i>Influencia de flujo de alimentación en el proceso continuo</i>	41
2.1.5 <i>Construcción de la matriz de diseño de los experimentos: el diseño factorial completo 2²</i>	43
2.1.6. <i>Estudios en continuo.</i>	43
2.1.6.1. <i>Pruebas hidráulicas y selección de los parámetros de operación.</i>	44
2.1.6.2. <i>Cuantificación de las muestras.</i>	44
2.2 <i>Metodología</i>	45
2.2.1. <i>Estudio de remoción en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.</i>	45
2.2.2. <i>Cálculo de la superficie de lecho no utilizada.</i>	45
2.3. <i>Criterios de escalado.</i>	46
2.3.1. <i>Metodología para el escalado de torres de adsorción.</i>	46
2.4. <i>Conclusiones Parciales</i>	46
CAPÍTULO III CAPÍTULO III	48
CAPÍTULO III	49
<i>Resultados a escala de laboratorio de la biosorción de Ni⁺² y Cr⁺⁶ en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar. Escalado del sistema y análisis económico preliminar.</i>	49
3.1. <i>Estudios de biosorción en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.</i>	49
3.1.1. <i>Pruebas hidráulicas.</i>	49
3.1.2. <i>Curvas de ruptura: ajuste de modelos y determinación de parámetros cinéticos</i>	49
3.1.2.1 <i>Modelo de Adams-Bohart para dos columnas en serie</i>	53
3.1.2.2 <i>Modelo de Thomas para dos columnas en serie</i>	55
3.1.2.4 <i>Modelo de Yoon y Nelson para dos columnas en serie</i>	58
3.1.2.5 <i>Modelo de Dosis-Respuesta para dos columnas en serie</i>	61
3.2 <i>Escalado del sistema de remoción de metales pesados con columnas rellenas con bagazo a escala de planta piloto</i>	63
3.2.1. <i>Cálculo de la altura de la cama del prototipo.</i>	64
3.2.2. <i>Cálculos de la caída de presión</i>	64

3.2.3 Dimensionamiento del sistema de bombeo.....	65
3.3 Cálculo de la masa de bagazo que se necesita en la planta piloto.	68
3.4 Análisis económico preliminar:	69
3.4.1 Estimación de los costos	69
3.4.1.1 Costo Total de Inversión.....	69
3.4.1.2-Costo del equipamiento.....	69
3.4.1.2 Inversión fija.....	70
3.4.1.3 Costos Totales de Tratamiento.....	70
3.4.1.4 Costo de la materia prima:	71
3.4.1.5 Costo de la mano de obra	71
3.4.1.7 Costo de tratamiento.....	71
3.4.1.8 Gastos generales	72
3.4.1.10 Ganancia del proceso	72
3.5.4. Indicadores de rentabilidad VAN, TIR, PRD.....	72
3.4 Comparación de precio de tratamiento con otros adsorbentes	73
CONCLUSIONES.....	75
RECOMENDACIONES.....	77
Bibliografía Referenciada.....	78

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La toxicidad de los metales pesados se ha documentado a lo largo de la historia: así, los médicos griegos y romanos diagnosticaron los síntomas por la ingestión de plomo. Históricamente, se ha considerado que hervir zumo en el recipientes de plomo ha podido ser causa de numerosos envenenamientos entre la población y con ello, haber contribuido a la caída del Imperio Romano (Gilfillan, 1965; Volesky, 1990). Hoy en día se sabe mucho sobre los efectos de metales pesados en la salud. La exposición a los metales pesados se ha relacionado con el retraso en el desarrollo, los distintos tipos de cáncer, dolor de riñón, e incluso la muerte en algunos casos.

Desafortunadamente, a pesar de la evidencia de sus efectos en el deterioro de la salud, la exposición a los metales pesados continúa. Es por tanto necesario evitar la entrada de metales tóxicos en los medios acuáticos y sobre todo que las industrias reduzcan la concentración de metales hasta unos niveles que no generan problemas de toxicidad. En muchos casos se han establecido normativas que regulan las cantidades máximas de metal que puede contener un efluente antes de ser vertido al medio acuático y así evitar la contaminación del medio en la fuente de origen.

La problemática mencionada demanda una tecnología limpia y capaz de retirar los contaminantes, permitiendo de nuevo su uso y el equilibrio de los ecosistemas. El tratamiento de efluentes es a veces un proceso más complicado que cualquier otro proceso de fabricación o manufactura de productos, debido a que las aguas a tratar pueden tener una composición muy variable en cuanto a componentes orgánicos o inorgánicos, acidez o basicidad extrema, presencia de sustancias volátiles, etc. Por tanto, son pocos los procesos que permiten la descontaminación de efluentes cumpliendo a la vez requisitos como pueden ser los costos, la flexibilidad en cuanto a la cantidad tanto de efluente a tratar como a la carga contaminante de éste, la continuidad de sistema, una mínima supervisión y mantenimiento y suficiente selectividad en cuanto a la descontaminación de los metales considerados (Vilchez, 2005).

Con el fin de eliminar los metales pesados del agua, se han empleado diferentes tecnologías, tales como la coagulación-floculación, precipitación química, intercambio iónico, adsorción, ósmosis inversa, electrodiálisis, etc. (Williams y col., 1998; Pagnanelli y col., 2000; Kurniawan y col., 2004; Lodiero y col., 2006). No obstante para disoluciones con

altas concentraciones de metales pesados (cientos o miles de mg/L) pueden emplearse algunas de las tecnologías citadas. El proceso de biosorción ha recibido una atención considerable en los últimos años. Sin embargo, en 1935 Adams y Holmes utilizaron las resinas del tanino de la corteza del zarzo negro (*A. mollissima*) para retirar iones de calcio y magnesio de aguas residuales. Este trabajo fue pionero en el campo del intercambio iónico y ha conducido de forma casual al campo de la biosorción. La eliminación de contaminantes tóxicos, como es el caso de los metales pesados, del agua residual industrial mediante biosorción se ha propuesto como proceso seguro y rentable, especialmente para el tratamiento de los altos volúmenes de soluciones con concentraciones bajas de metal si, además, se combina con la recuperación del metal por un proceso de desorción (Brierley, 1990). El proceso de biosorción es un proceso muy complejo en el que intervienen diferentes mecanismos y que depende del pH, la temperatura, la fuerza iónica, los sitios de unión y la presencia de otros iones. Una vez que se han llevado a cabo los experimentos para determinar la potencialidad de un sólido como biosorbente de metales pesados, es preciso replantearse su aplicación a escala de planta piloto o industrial.

Los residuos líquidos que precisan tratamiento antes del vertido al medio ambiente pueden ser:

- Elevados volúmenes líquidos que contienen pequeñas concentraciones de metales contaminantes (<100 mg/l) como son, por ejemplo, los residuos de la explotación minera.
- Pequeños volúmenes líquidos que contienen altas concentraciones de metales contaminantes, como ocurre en las industrias de tratamientos metálicos de superficie.

En el primer caso, se debe usar un biosorbente que tenga una elevada afinidad por el tipo específico de metal contaminante mientras que en el segundo, el biosorbente debe tener una elevada capacidad de retención de metales pesados en general (Kratochvil y Volesky, 1998). Con respecto al origen de los biosorbentes, Vieira y Volesky (2000) señalan que puede ser alguno de los siguientes:

- Residuos procedentes de diversas actividades industriales, por lo que su precio es muy bajo o nulo.
- Organismos fácilmente disponibles y que se encuentren en grandes cantidades en la naturaleza.

- Organismos especialmente cultivados para su uso en biosorción, con una capacidad de reproducción muy elevada.

Se han encontrado diferentes tipos de biosorbentes que son efectivos para concentrar y recuperar metales pesados. Entre ellos, diversos residuos agrícolas como raíces de plantas de té (Chen et al., 1996), residuos de manzana (Chong et al., 1998), residuos de olivares (Gharaibeh et al., 1998; Vegliò et al., 2003; Tenorio, 2006; Martín-Lara, 2008), cáscara de arroz (Khalid et al., 1998; Montanher et al., 2005), pulpa de azúcar de remolacha (Reddad et al., 2002), fibra de enebro (Min et al., 2004), residuos de los tallos de las uvas (Villaescusa et al., 2004), residuos tropicales (Acheampong et al., 2011), además de numerosas especies de bacterias, hongos y algas (Volesky y Holan, 1995; Leusch et al., 1996; Bailey et al., 1999; Zouboulis et al., 1999, Zheng et al., 2008; Zheng et al., 2009; Wang et al., 2010). Suh y Kim (2000) presentaron una interesante revisión que recoge una amplia variedad de biosorbentes potenciales de bajo costo y alta disponibilidad. Igualmente, Volesky y Holán (1995) y Volesky (2003) presentan una completa revisión de los tipos de biomasa de mayor uso en la eliminación de los metales contaminantes más frecuentes.

En este trabajo, se ha seleccionado bagazo de caña de azúcar, por su alta disponibilidad y bajo costo en Cuba, para la eliminación de Cr^{+6} y Ni^{+2} en medios acuosos, y se propone la solución del siguiente:

Problema científico:

El diseño y optimización de una columna o varias columnas en serie de lecho fijo requiere del conocimiento de la relación existente entre el equilibrio y la transferencia de masa en el interior de las partículas de sorbente, además de las propiedades del flujo del fluido en la columna. En estos sistemas, la concentración en la fase líquida y en la fase sólida varía tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que el diseño y optimización de columnas de lecho fijo tiene especial dificultad si no se cuenta con un modelo de aproximación cuantitativo. Para la remoción de Cr^{6+} y Ni^{2+} con bagazo de caña de azúcar en columnas es insuficiente la información sobre la modelación de las curvas de ruptura y no se reportan modelos para columnas en serie.

Para dar solución a este Problema Científico se propone la siguiente:

Hipótesis;

Es posible predecir la respuesta de los sistemas cuando cambian las condiciones de operación en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar para remover Cr^{6+} y Ni^{2+} a través de modelos matemáticos basados en el principio de conservación de la masa, lo que además facilitaría el análisis e interpretación de datos experimentales y pueden desempeñar un papel importante en el cambio de escala, desde el laboratorio a una escala superior.

Objetivo general

Modelar la biosorción de Cr^{6+} y Ni^{2+} en columnas en serie rellenas con bagazo de caña de azúcar como biosorbente.

Objetivos específicos

- Realizar pruebas hidrodinámicas en el sistema de columnas en serie instalado.
- Evaluar el comportamiento de la remoción de Cr^{6+} y Ni^{2+} en el sistema de dos columnas y también individualmente en cada columna.
- Modelar las curvas de ruptura de la biosorción Cr^{6+} y Ni^{2+} en una columna rellena con bagazo de caña de azúcar para diferentes condiciones de operación
- Modelar las curvas de ruptura de la biosorción de Cr^{6+} y Ni^{2+} en columnas de lecho fijo conectadas en serie.

CAPITULO I

CAPITULO I

1. Revisión Bibliográfica

1.1. Contaminación ambiental por metales pesados.

Los ecosistemas acuáticos y terrestres tienen una capacidad autodepuradora de iones metálicos puesto que muchos de ellos son necesarios para el desarrollo de los seres vivos (Vilchez, 2005). Elementos como el cromo, manganeso, cobalto, cobre, zinc, molibdeno, vanadio o hierro por su alta toxicidad se consideran entre los más agresivos tanto para el ecosistema como para la salud de la población, cuando se encuentran en concentraciones elevadas.

Los metales pesados como cadmio, cromo, plomo, mercurio, estaño, arsénico, cobre, níquel o talio, son descargados tanto a la atmósfera como a los ambientes acuáticos y terrestres en forma de solutos o partículas pudiendo alcanzar composiciones altamente tóxicas, especialmente cerca del lugar de descarga; aunque también es posible que se produzca la concentración del metal a lo largo de su recorrido ambiental. Estos metales pueden detectarse en el medio ambiente en su estado elemental lo que implica que no están sujetos a biodegradación o a formación de complejos salinos por lo que en estas circunstancias no pueden ser mineralizados (Atkinson y col., 1998).

Una vez emitidos al medio, los metales pesados pueden permanecer en el entorno durante centenares de años. Es difícil seguir la evolución de las especies metálicas una vez que hayan penetrado en el entorno y evitar que sus amenazas se vayan dispersando por las diferentes latitudes. Además, los metales pesados se acumulan en los tejidos a través de la cadena alimentaria, la cual tiene a los seres humanos como último destino. Por lo tanto, controlar los vertidos de metales pesados y la eliminación de estos de las aguas, se ha convertido en un reto para este nuevo siglo.

1.2. Metales pesados: Características y comportamiento

Los metales pesados son elementos con elevados pesos atómico, superiores a 44,956 y una densidad superior a 5 g/cm^3 , excluyendo a los grupos Alcalinos y Alcalinotérreos. Aunque algunos son imprescindibles para el desarrollo de las funciones vitales de los organismos, los denominados esenciales como cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, vanadio y estroncio, en cantidades excesivas son perjudiciales e incluso letales para los seres vivos. Los metales pesados no esenciales, comúnmente implicados en problemas de

contaminación de las aguas subterráneas son: cromo, cadmio, mercurio, plomo, arsénico y antimonio (Kenninsh, 1992).

En la Tabla 1.1 se indican los principales vertidos exógenos que contienen metales pesados (Díaz Rengifo, 2001):

Tabla 1.1 Los principales vertidos exógenos que contienen metales pesados

Fuente	Contribución, %
Cenizas de combustión	74
Desechos urbanos	9
Turba	6
Residuos metalúrgicos	6
Residuos de materia orgánica	3
Fertilizantes	<2
Otros (residuos alimentarios, agrícolas, industriales, madera, etc.)	<1

Generalmente la toxicidad de los metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos. Pueden incorporarse en el cuerpo humano a través de los alimentos, el agua, el aire, o la adsorción a través de la piel cuando entran en contacto con los seres humanos en agricultura y en procesos de fabricación, farmacéuticos e industriales. La exposición industrial se considera una ruta común de captación para los adultos, siendo la ingestión la ruta más común en los menores.

1.3 Impacto del Cromo a los seres vivos

El cromo es un metal pesado ampliamente usado a nivel industrial. Las principales fuentes de contaminación por este metal son, además de los residuos de los procesos industriales, la minería y los procesos de obtención del mismo (Singh y Tiwari ,1997; Gavrilesco, 2004). Los riesgos sobre la salud asociados a la exposición a cromo dependen del estado de oxidación en que se encuentre. Los compuestos de Cr^{+6} son tóxicos para animales y humanos porque son muy oxidantes. Por ello, son potencialmente carcinógenos y

mutagénicos, pudiendo ser mortales si se ingieren dosis de unos pocos gramos (Singh y Tiwari, 1997; Hamadi y col., 2001; Demirbas y col., 2004 y Park y col. 2004).

En los humanos causa irritación y corrosión de la piel, tracto respiratorio, ojos y mucosas, formación de úlceras, daños en el hígado, problemas respiratorios, congestión pulmonar, edemas y debilitamiento en el sistema inmunológico. Este último al formar heptanos con proteínas una vez que se reduce a Cr^{+3} en el interior de las células. Una fuerte exposición al Cr^{+6} causa cáncer en el tracto digestivo y en los pulmones y puede causar dolor epigástrico, náuseas, vómitos y severas diarreas y hemorragias. El cromato de Zinc es el compuesto más cancerígeno (Raji y Anirudhan, 1998; Das y col., 2000; Solisio y col., 2000; Gupta y col., 2001).

1.4. Impacto del Níquel a los seres vivos.

El níquel en los sistemas acuáticos suele estar presente en su mayor parte en forma soluble y sólo una baja proporción forma complejos no muy estables. Sus principales usos industriales se dan en la producción de aceros inoxidables, aleaciones, electrochapados de aparatos electrónicos y recubrimientos de piezas metálicas, baterías alcalinas (Ni-Cd), pigmentos inorgánicos (esmaltes cerámicos), material electrónico, y otros. Algunas personas sensibles al níquel pueden desarrollar dermatitis en la piel lejos del área de contacto; el eczema de la mano es relativamente común en personas sensibles a este metal. Otros de los efectos perjudiciales a la salud por exposición al níquel lo constituyen la bronquitis crónica, disminución de la función pulmonar, cáncer de pulmón y los senos nasales, frecuente en personas que han inhalado polvo que contenía compuestos de níquel en el trabajo en refinerías de níquel o en plantas de procesamiento de níquel.

1.5- Tratamientos tradicionales a residuales con metales pesados.

El tratamiento de efluentes contaminados es un proceso complicado, en ocasiones incluso más que cualquier otro proceso de fabricación o manufactura de productos, debido a que las aguas a tratar pueden tener una composición muy variable en cuanto a componentes orgánicos o inorgánicos, acidez o basicidad extrema, presencia de sustancias volátiles, etc.

Para eliminar metales pesados de efluentes líquidos se han empleado diferentes tecnologías como la coagulación-floculación, precipitación química, adsorción, electrodiálisis,

intercambio iónico, ósmosis inversa, etc. (Williams y col., 1998; Pagnanelli y col., 2000; Chang y col. 2002; Zhang y Banks, 2005).

1.5.1 Tratamiento físico-químico.

Las plantas de tratamientos de residuos tóxicos y peligrosos son instalaciones donde los residuos deben ser sometidos a un tratamiento físico-químico, como puede ser la oxidación, reducción, neutralización, filtración, estabilización, etc., para disminuir la peligrosidad, incluyendo cuando sea posible, la recuperación de algunos de sus constituyentes para su reutilización.

Una línea general de tratamiento constaría de los siguientes procesos:

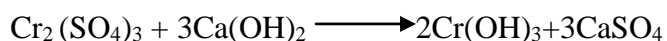
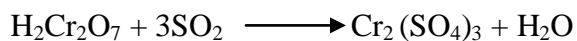
- Homogenización de residuos.
- Eliminación de sólidos en suspensión.
- Separación de aceites, hidrocarburos.
- Eliminación de cromo hexavalente.

1.5.2 Tratamientos de oxidación-reducción

Las reacciones químicas de oxidación-reducción se emplean para reducir la toxicidad o la solubilidad, o para transformar una sustancia en otra más fácilmente manipulable. Como se ha visto con anterioridad esta operación mayoritariamente se combina con la precipitación química.

Las reacciones químicas de reducción se emplean principalmente para el tratamiento de corrientes que contiene cromo hexavalente, mercurio y plomo. Los agentes reductores más comunes son el dióxido de azufre, sales de sulfitos y sales de hierro.

Los procesos de reducción y precipitación de corrientes residuales que contienen cromo involucran una reducción del cromo hexavalente al estado trivalente en condiciones ácidas, pH 3, empleando dióxido de azufre como agente reductor, seguida de una precipitación con hidróxido calcio, en condiciones básicas, con pH entre 8 y 9:



Según (Sotelo S. J.L., Beltrán N.F., 1997) los procesos de oxidación reducción pueden ser agrupados en cuatro grupos:

1. Oxidación por aire a bajas temperaturas, mediante microorganismos aerobios (oxidación biológica utilizada en los tratamientos secundarios)
2. Combustión de residuos a elevadas temperaturas (fundamentalmente analizado en el tratamiento de residuales sólidos)
3. Oxidación química a bajas temperaturas con agentes fundamentalmente oxidantes (principalmente cloro, dióxido de cloro, ozono, agua oxigenada o peróxidos).
4. Oxidación química a temperaturas a presión elevadas con oxígeno o aire.

1.5.3 Lixiviación

La lixiviación es una operación unitaria utilizada para separar las partículas líquidas o sólidas de baja densidad de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo burbujas finas de gas (generalmente aire) en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascendente (Principio de Arquímedes) del conjunto de partículas y burbujas de gas es tal, que hace que la partícula ascienda a la superficie. De esta forma se pueden remover partículas de densidad menor que el líquido. Una vez que las partículas se hallan en la superficie, pueden recogerse mediante un rascador superficial (Metcalf-Eddy, 1988). Existen tres métodos de flotación utilizados en el tratamiento de aguas residuales: flotación por aire a presión atmosférica, flotación por aire disuelto (FAD) y flotación por vacío. En el modelo de flotación por aire disuelto, el aire se inyecta en el agua residual a presión y posteriormente se procede a la liberación de la presión hasta alcanzar la presión atmosférica.

Lepri et al. (2000) reportan eficiencias del 80% de remoción de materia orgánica en compuestos orgánicos. Huang et al. (2000) reportan la remoción de metales pesados en aguas residuales, absorbidos por coloides utilizando el cloruro de poli aluminio como coagulante y la flotación como método de remoción.

En estudios realizados en aguas residuales domésticas utilizando la flotación como método de remoción para metales pesados distintos autores reportan remociones obtenidas para distintos metales, Adeyiga et al. (2000) reportan remociones de Pb 96%, Ni 61% y Zn 71

%, Pavlovska, et al. (2003) reportan remociones de Cd 99%, Mn 99% y Feris et al. (2002) reportan remociones de Zn 89%, Cu 81% y Ni 67%

1.5.4 Intercambio de Iones

Este proceso se ha usado en la industria del acabado metálico desde hace décadas. Un sistema común en el acabado metálico cuenta con un lecho fijo de resina capaz de intercambiar o retirar de las aguas residuales cationes o aniones de los cromátos. Los iones bivalentes y trivalentes son más fáciles de retirar mediante el intercambio iónico que los iones monovalentes. La ventaja principal de este sistema es que puede seleccionar lo que debe retirar. Tienen la desventaja de carecer de la instrumentación adecuada para avisar cuando la resina se satura. Otra desventaja es que incluyen la necesidad de un equipo de tratamiento adicional para modificar el flujo regenerante por una química adecuada para la reutilización en casos selectos. El intercambio iónico es muy usado para retirar iones específicos del agua de enjuague en el tanque.

1.5.5 Ósmosis Inversa

Se emplea para separar el agua de las sales inorgánicas a través de una membrana que permite el paso del agua pero impide el paso de las sales. Trabaja con presiones de entre 400-800 psi, generadas por bombas, a fin de impulsar el agua para que pase a través de la membrana y deje tras si un líquido residual. Las membranas están hechas de acetato de celulosa. El costo de las membranas puede representar el 50% o más del costo del equipo. Aparte de los problemas de ensuciamiento, los sistemas de ósmosis inversa son muy sensibles a la temperatura.

1.5.6 Electrodiálisis

Es un proceso que emplea una batería de membranas selectoras de iones separadas por espacios muy pequeños a través de las cuales los materiales iónicos se transfieren o rechazan de manera selectiva. La fuerza que impulsa a los iones a migrar dentro de la pila es un potencial eléctrico que un rectificador aplica a dos electrodos. El equipo para electrodiálisis es muy costoso e implica el mismo grado de ensuciamiento de las membranas y los mismos problemas de costo de reemplazo que los sistemas de ósmosis inversa.

1.5.7 Otros sistemas

Existe una serie de otros esquemas de recuperación y reciclado destinados a los residuales de la industria de acabado metálico. Un proceso patentado especial es un sistema a base de resina para purificar el ácido contaminado con metales pesados. La resina retiene el ácido y permite que el metal pesado pase a través de ella. Una vez que el ácido ha sido sometido a retro-lavado, es liberado de la resina y devuelto al proceso.

1.6- Biosorción, alternativa novedosa para remover metales pesados en residuales industriales.

El término “biosorción” se ha acuñado para describir el fenómeno de captación pasiva de iones metálicos, basado en la propiedad que ciertos tipos de biomazas inactivas o muertas poseen para enlazar y acumular este tipo de contaminantes por diferentes mecanismos (adsorción física, complejación, intercambio iónico, etc.) (Vegliò y Beolchini, 1997; Zouboulis y col., 1999; Volesky, 2001; Davis y col., 2003; Gravilescu 2004; Baytak y Turkes, 2005 y Zhang y Banks, 2006). Esto implica que el mecanismo de eliminación no está controlado metabólicamente. La biosorción es una de las tecnologías más prometedoras para la retirada de metales tóxicos de las aguas residuales ya que, al tratarse de un proceso con características únicas, lo convierte en una alternativa potencial a los procesos convencionales, entre otras cuestiones, porque es un proceso generalmente rápido y que resulta muy interesante para la extracción de iones metálicos a bajas concentraciones de grandes volúmenes de agua (Brady y col.,1999; Pagnanelli y col.,2000; Deng y Ting 2005 y Zhou y col., 2005).

1.6.1 Mecanismos de biosorción

Para la fijación de metales pesados en la biosorción se han sugerido una serie de mecanismos que explican la retención o secuestro del metal en diferentes partes del biosorbente. Entre ellos se encuentran:

- Complejación o quelación: el metal se une a los centros activos de la pared celular mediante enlaces químicos formando determinados complejos.
- Adsorción física: se incluyen aquí los fenómenos asociados a fuerzas de Van der Waals. En este caso la biosorción es rápida y reversible.

- Intercambio iónico: propio de los iones metálicos divalentes que se intercambian con iones propios de los polisacáridos presentes en la biomasa. El proceso también es rápido y reversible.
- Microprecipitación: el mecanismo está asociado a la formación de un complejo en la pared celular que posteriormente es hidrolizado.

Generalmente se considera que en la biosorción de metales pesados pueden aparecer simultáneamente más de uno de los mecanismos señalados, siendo, en algunos casos, muy difícil de explicar el o los mecanismos que tienen lugar en un proceso de biosorción determinado (Ho y col., 2001).

1.7 Diseño de columnas de lechos empacados

El sistema de lecho fijo consiste en una columna donde el biosorbente granulado se deposita en su interior como un lecho, que normalmente no se mueve; el líquido atraviesa la columna en sentido ascendente o descendente. El granulado del biosorbente ha de tener un tamaño adecuado para evitar una presión excesiva a lo largo de la columna, si bien hay que tener en cuenta que partículas demasiado grandes provocan un descenso en la superficie útil del biosorbente, haciendo que la difusión intraparticular se vea limitada. La columna puede operar en serie para llevar un mejor control sobre el rendimiento del biosorbente o en paralelo para incrementar la capacidad del sistema, pudiendo ser usadas tantas columnas como sea necesario para optimizar el diseño del proceso completo.

1.7.1 Biomosas utilizadas como material biosorbente.

(Teixeira Tarley and Zezzi Arruda, 2004) refieren el uso de la cáscara de arroz con una excelente alternativa en la remoción de especies químicas como el Cd^{+2} y Pb^{+2} provenientes de efluentes. La caracterización física de este material señala la presencia de grupos funcionales como el carboxilato y el silanol, que hacen posibles el proceso de adsorción en la morfología del material.

También se ha utilizado huesos de aceitunas, cascaras de piña, cascaras de piñón, corteza de pino y cascaras de almendra para la remoción por diferentes autores (Martin-Lara, 2008; Ruiz Elena, 2012). La patente cubana "Procedimiento de depuración de iones metálicos de aguas residuales", refiere el uso de carbón activado obtenido a partir de meollo de caña de

azúcar para depurar aguas residuales contaminadas con cromo hasta concentraciones de 2,5 ppm con tiempos de contacto hasta de una hora y temperaturas de 10 a 40 °C. Esta patente refiere a otras patentes que tratan el uso de adsorbentes naturales modificados de diferentes formas para mejorar sus propiedades, entre ellas están: (Patente cubana, 1987), (Patente cubana, 1996). El uso del tallo de girasol, con previo tratamiento químico, como material adsorbente para remover Cr^{3+} alcanzándose hasta un 85% de remoción, también es reportado (Rasul Malika and Moosa Hasanyb, 2005).

Tabla 1.2 Capacidades máximas de biosorción de diversos metales encontradas para diferentes materiales biosorbentes (mg/g).

Sorbente	Cd^{+2}	Cr^{+3}	Cr^{+6}	Ni^{+2}	Pb^{+2}
Quitosa	558	92	273	2,4	796
Cáscara de nuez	1,5	-	1,33	-	-
Corcho	32	19,5	-	4,1	182
Vaina del arroz	21,36	-	164,31	-	11,4
Algas marinas	215	-	-	-	344
Corteza de pino	8	19,45	-	-	3,33
Estiércol	15,73	-	640	-	1030

(Pérez Marín, 1983) ejemplificó la extracción de Índigo y otros metales, con un porcentaje de remoción del 90%, utilizando meollo de caña de azúcar tratado como biosorbente.

La disponibilidad y el bajo costo del bagazo de caña en Cuba, permite utilizarlo como biosorbente de metales pesados, pues las experimentaciones realizadas arrojaron como resultado la elevada capacidad como biosorbente previa activación con ácido sulfúrico 0,5 N con un consecuente proceso tecnológico concebido para estos efectos (Rodríguez Rico, 2003).

1.7.2 Modelado de columnas de lecho fijo

La opción de biosorción más comúnmente utilizada para su aplicación en el tratamiento de aguas residuales industriales es el sistema de columna de lecho fijo (Stenzel, 1993).

Desde un punto de vista práctico, los procesos de biosorción a gran escala se llevan a cabo de un modo continuo (Vijayaraghavan et al., 2005). En estos sistemas, la concentración en la fase líquida y en la fase sólida varía tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que el diseño y optimización de columnas de lecho fijo tiene especial dificultad si no se cuenta con un modelo de aproximación cuantitativo. En este sentido, el comportamiento dinámico de una columna de lecho fijo es descrito en términos de perfil “concentración de efluente-tiempo”, es decir, lo que se conoce como curva de ruptura (breakthrough).

Una curva de ruptura típica es la que se muestra en la Figura 1.1 y representa la relación entre las concentraciones de contaminante a la salida y a la entrada de la columna frente al tiempo o al volumen circulado. La zona de transferencia de masa es la superficie del lecho en la que ocurre la sorción. El fluido entra en la columna y circula a través de un lecho que no contiene soluto de forma que, cuando entra en contacto con el sorbente, el soluto es rápidamente retenido durante el primer contacto. Este fluido abandona la columna prácticamente libre de iones metálicos. Cuando el volumen de fluido comienza a atravesar la columna, empieza a definirse una zona de transferencia de masa que varía desde el 0 % de la concentración inicial (correspondiente al sorbente sin soluto) hasta el 100 % de la concentración inicial (correspondiente a la saturación total). De esta forma, cuando el metal ya no puede ser retenido completamente, comienza a aparecer en el fluido que abandona la columna. En el momento en que la concentración de metal en el efluente alcanza un determinado valor, generalmente relacionado con el límite de vertido permitido para ese metal, se llega al llamado punto de ruptura y se corresponde con un tiempo llamado tiempo de servicio o de ruptura, t_r , que permite determinar el volumen de efluente tratado. A partir de este punto, la representación muestra la evolución de la concentración durante el tiempo de funcionamiento de la columna, lo que se corresponde con la llamada curva de ruptura.

Cuando, en la zona de transferencia, el sorbente de la columna queda totalmente saturado, las concentraciones de entrada y salida del efluente de la columna son iguales.

Desde un punto de vista práctico, el tiempo al que ocurre la saturación, t_s , se establece cuando la concentración en el efluente es superior a un valor comprendido entre el 90 % y el 95 % de la concentración inicial. Para describir la curva de ruptura, existen numerosos modelos que pueden ser, desde modelos simples semiempíricos de pocos parámetros y fáciles de resolver matemáticamente, hasta modelos rigurosos que consideran dispersión

axial en la dirección de flujo, resistencia a la difusión en la película, difusión intraparticular, la cual puede incluir difusión en la superficie y en los poros, etc., que generalmente requieren soluciones numéricas complicadas (Chu, 2003).

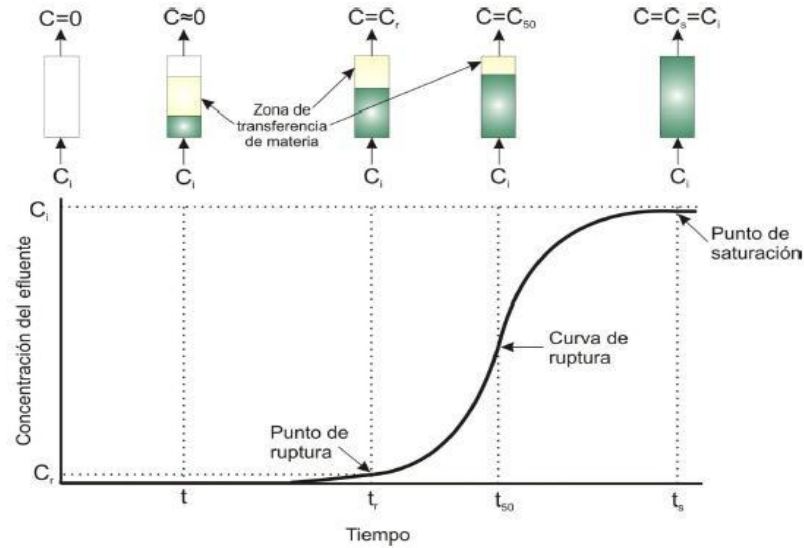


Figura 1.1 Relación de las concentraciones a la entrada y salida de la columna en función del tiempo.

El diseño y optimización de una columna de lecho fijo requiere del conocimiento de la relación existente entre el equilibrio y la transferencia de materia en el interior de las partículas de sorbente, además de las propiedades del flujo del fluido en la columna. Los modelos matemáticos, basados en el principio de conservación de la masa, desempeñan un papel fundamental en el cambio de escala, es decir, en el paso del laboratorio a escala industrial. Estos modelos pueden ayudar no solamente a analizar e interpretar datos experimentales, sino también a predecir la respuesta de los sistemas cuando cambian las condiciones de operación (Kratochvil, 1997).

Como se ha comentado anteriormente, el funcionamiento de las columnas de lecho fijo se describe mediante el concepto de curva de ruptura. El tiempo de operación y la forma de la curva son características muy importantes para determinar la respuesta de una columna de biosorción. La curva de ruptura muestra el comportamiento de una columna de lecho fijo desde el punto de vista de la cantidad de metal que es posible retener y, usualmente, es expresada en términos de una concentración normalizada definida como el cociente entre las concentraciones de metal en el líquido a la salida y a la entrada de la columna (C/C_i), en

función del tiempo o del volumen de efluente, para una altura de lecho fija. El volumen de efluente, V_{ef} (mL), puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ef} = Qt_{total} \quad (1.1)$$

Donde:

t_{total} representa el tiempo total, min

Q es el caudal que circula por la columna, mL/min

El área bajo la curva de ruptura, entre los límites apropiados, representa la cantidad total de metal retenido (o capacidad máxima de la columna), q_{total} , en mg, para una determinada concentración de la alimentación y puede determinarse por integración,

$$q_{total} = \frac{Q}{1000} \int_{t=0}^{t=t_{total}} C_R dt \quad (1.2)$$

Donde:

C_R es la concentración de metal retenido, mg/L

La cantidad total de metal que pasa por la columna, m_{total} , en mg, puede ser calculada mediante la siguiente expresión,

$$m_{total} = \frac{C_i Q t_{total}}{1000} \quad (1.3)$$

y, por tanto, el porcentaje total de metal retenido durante la operación de la columna se obtendría como,

$$\%Retenido = \frac{q_{total}}{m_{total}} \times 100 \quad (1.4)$$

Los estudios de equilibrio en columna requieren del conocimiento de la capacidad de biosorción, q_e (mg de metal sorbido/g de sorbente), y la concentración de metal que permanece en disolución cuando se alcanza el equilibrio, C_e (mg/L), y pueden ser determinados por las siguientes expresiones,

$$q_e = \frac{q_{total}}{m} \quad (1.5)$$

$$C_e = \frac{m_{total} - q_{total}}{V_{ef}} \cdot 1000 \quad (1.6)$$

Donde:

m, masa de sorbente utilizada en la columna, g

A continuación se describen los modelos que se han seleccionado para este trabajo, atendiendo, fundamentalmente, a las condiciones de aplicación de cada uno de ellos y a su

utilización para el estudio de los procesos de biosorción en columna por la mayoría de los investigadores.

1.7.2.1 Modelo de Bohart y Adams:

El modelo de Bohart y Adams proporciona un acercamiento simple y comprensivo al funcionamiento y evaluación de los sistemas de remoción en lecho fijo (columnas); por ello se usa en la descripción de la parte inicial de la curva de ruptura (Adams *et al.*, 1920). En su forma típica la ecuación de Bohart y Adams tiene la siguiente presentación:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = K_{ab} \cdot C_0 \cdot t - \frac{K_{ab} \cdot N_0 \cdot Z}{v} \quad (1.8)$$

La capacidad remoción se calcula según las siguientes ecuaciones,

$$q = \frac{N_0 \cdot BV_s}{m} = \frac{N_0}{\rho} \quad (1.9)$$

Donde K_{ab} es la constante de velocidad de adsorción, N_0 la capacidad de adsorción, Z la altura del lecho fijo del adsorbible, v es la velocidad de flujo lineal, t es el tiempo de servicio de la columna y, C_0 y C son, respectivamente, la concentración del adsorbato a la entrada al lecho y, a la salida de la columna, a un tiempo t . BV_s es el volumen del lecho fijo y ρ la densidad aparente de la cama fija.

1.7.2.2 Modelo de Yoon y Nelson:

El modelo de Yoon y Nelson es relativamente un modelo simple para un sistema unicomponente. Si A es el soluto adsorbido en la cama y P la fracción del soluto remante en el efluente, la velocidad de adsorción se expresa por

$$-\frac{\partial A}{\partial t} = k_{YN} \cdot (t - \tau) \quad (1.10)$$

Donde, k_{YN} es la constante del modelo (min^{-1}).

Substituyendo $P=1-A$ y si $A=0,5$ en el tiempo τ , la integración de la ecuación (1.13) queda como:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0 - C}\right) = k_{YN} \cdot (t - \tau) \quad (1.11)$$

Donde τ es el tiempo cuando, $\frac{C}{C_0} = 0,5$

De la dependencia lineal de $\ln\left(\frac{C}{C_0 - C}\right)$ versus tiempo (t), se determinan los parámetros del modelo k_{YN} y τ para una altura dada, flujo y la concentración inicial.

1.7.2.3 Modelo de Thomas

El Modelo de Thomas es uno de los modelos teóricos más usados para describir el funcionamiento de columna. (Rozada *et al.*, 2007). Este modelo esta descrito por:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\left(\frac{K_{th}}{F}\right)(q_{\infty}x - C_0V_{ef})\right)} \quad (1.12)$$

Donde, C_0 y C_t son concentración de la entrada y la salida de los residuos, (mg L^{-1}), K_{th} es la constante de Thomas ($\text{mL /mg}\cdot\text{min}^{-1}$), q es la capacidad máxima de adsorción (mg g^{-1}), x cantidad de adsorbente en la columna (g), V_{ef} es el volumen de la solución (mL) and F es el flujo volumétrico (mL min^{-1}).

La linearización la ecuación (1.15) da

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \frac{K_{th}\cdot q\cdot m}{Q} - \frac{K_{th}\cdot C_0}{Q} V \quad (1.13)$$

De la dependencia lineal de $\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right)$ vs t , pueden ser calculadas la capacidad de remoción y la constante de Thomas.

1.7.2.4 Modelo de Dosis Respuesta

Este modelo, que ha sido comúnmente utilizado en farmacología para describir diferentes tipos de procesos, está siendo empleado en la actualidad para los describir los procesos de biosorción en columnas (Yan *et al.*, 2001 y Senthilkumar *et al.*, 2006).

La ecuación general que representa este modelo es la siguiente:

$$Y = b_0 - \frac{b_0}{1 + \left(\frac{X}{b_2}\right)^{b_1}}$$

(1.14) Donde X e Y representan la dosis y la respuesta en términos de porcentaje de la máxima respuesta posible, respectivamente. El parámetro b_0 es la respuesta esperada cuando se alcanza la saturación, b_1 representa la pendiente de la función y b_2 indica la concentración a la cual se produce la mitad de la respuesta máxima.

El modelo de Dosis respuesta para el estudio de biosorción en columnas tiene la siguiente forma:

$$\frac{C}{C_i} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{C_i V_{ef}}{q_0 m} \right)^a} \quad (1.15)$$

Este modelo tiene una importancia relativa ya que describe, normalmente, la curva completa de ruptura con gran exactitud. Sin embargo, es difícil relacionar el parámetro empírico “a” con las condiciones experimentales, por lo que resulta prácticamente imposible la realización de un cambio de escala del sistema (Yan et al., 2001).

1.8 Criterios de escalado.

Para aplicar el escalado a nivel de planta piloto se emplea la metodología propuesta por (Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010), la cual se basa en tomar en consideración los parámetros de operación del modelo, en función de las mejores condiciones a la cual opera el mismo.

La metodología plantea que tanto para el modelo como para el prototipo se deben cumplir los siguientes principios:

1. Existirá similitud geométrica.
2. Existirá similitud térmica, pues el rango de temperatura de trabajo no varía.
3. Las propiedades físicas del fluido se mantienen constantes para garantizar el régimen de transferencia de masa, existiendo similitud cinemática.
4. Existirá similitud dinámica, dado que el Reynolds es constante.
5. El régimen de transferencia de masa se mantiene constante.

Donde:

L	Modelo Experimental (a nivel de laboratorio).
P	Modelo a escala de planta piloto.
e	Porosidad.
D	Difusividad del cromo.
ρ	Densidad del cromo (g/cm^3)
μ	Viscosidad ($\text{gcm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
Q	Flujo de la solución. (mL/min)
A	Área de la columna. (cm^2)

v_o	Velocidad del fluido a través de la cama. (cm/min)
H	Altura de la cama. (cm)
D	Diámetro de la columna. (cm)
Re	Número de Reynolds.
ΔP	Caída de presión. (Pa)
ψ	Esfericidad o factor de forma.
k	Coefficiente de transferencia de masa (s^{-1})

1.8.1 Procedimiento a seguir:

El modelo a escala de laboratorio y planta piloto serán iguales geométricamente, por lo que la relación es constante e igual en cada sistema, cumpliéndose que:

$$\frac{H_{LP}}{H_{LM}} = \frac{d_{cp}}{d_{cm}} \quad (1.16)$$

Las propiedades físicas del fluido no varían, por tanto;

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \frac{\mu_p}{\mu_m} \quad (1.17)$$

El rango de temperatura no varía, por lo que se considera similitud térmica.

En operaciones de adsorción, absorción o reacciones catalíticas en lecho fijo o fluidizado, el escalado se efectúa sin variar el tipo de partícula, por lo que la naturaleza, dimensiones y porosidad se mantienen en ambos sistemas, donde se cumple que:

$$Re_m = Re_p = \text{constante.}$$

Relación de parámetros entre el modelo y el prototipo.

$$\frac{Re_p}{Re_m} = 1 \quad (1.18)$$

Al considerar que los sistemas homólogos son semejantes geométrica y térmicamente, se cumple que:

$$v_{om} = v_{op} = K_1 \quad (1.19)$$

Significa que manteniéndose constante las dimensiones entre el modelo del laboratorio y el de la planta piloto así como las propiedades del fluido que circula a través de la columna y el tipo de partícula que se emplee como adsorbente, la velocidad superficial tiene que ser la misma para ambos sistemas (Treybal, 1980).

Obsérvese como influye esto en la ecuación de escala escogida:

$$k_{fap} = \frac{10.9 * Q(1-\epsilon)}{d_p * A} \left(\frac{D_f}{d_p \frac{Q}{A}} \right)^{0.5} \left(\frac{D_f \rho_f}{\mu} \right)^{0.16} \quad (1.20)$$

Como $\frac{Q}{A} = v_o$. Luego sustituyendo en la ecuación siguiente:

$$k_{fap} = \frac{10.9 * v_o(1-\epsilon)}{d_p} \left(\frac{D_f}{d_p v_o} \right)^{0.5} \left(\frac{D_f \rho_f}{\mu} \right)^{0.16} \quad (1.21)$$

k_{fap} es función de v_o y $v_o = K_1$ como entonces k_{fap} tiene que ser la misma para ambos sistemas, donde K_1 es constante. Si se mantiene constante la velocidad superficial (v_o) la relación de parámetros entre el modelo y el prototipo, será igual en lo referente a la transferencia de masa.

1.8.2 Caída de presión:

Si se selecciona el primer término de la ecuación de Ergun:

$$\frac{\Delta P}{H_L} = \frac{150(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} * \frac{\mu * v_o}{\psi^2 d_p^2} \quad (1.22)$$

Donde, ϵ = porosidad, μ = viscosidad, v_o = velocidad superficial, ψ = factor de forma, y d_p = diámetro de partículas.

Manteniendo constante μ, ϵ, ψ y d se llega a la siguiente relación:

$$\frac{\Delta P}{H_L} \text{ es función de } v_o$$

Lo que implica que el valor de caída de presión por unidad de longitud o altura del lecho, depende sólo de que se mantenga la misma velocidad de fluido, o lo que es lo mismo:

ΔP sea función de $H_L * v_o$ y como $v_o = K_1$, entonces solo depende de H_L .

$$\frac{\Delta P_m}{H_{Lm}} = \frac{\Delta P_p}{H_{Lp}} \quad (\text{Relación de Escala}) \quad (1.23)$$

Desarrollando el procedimiento y conociendo los datos del modelo, se pueden obtener los resultados para el prototipo.

1.9 Conclusiones parciales.

- Metales pesados como el Cr^{+6} y el Ni^{+2} aparecen frecuentemente en aguas residuales industriales provocando afectaciones al medio ambiente y al hombre y los tratamientos convencionales para reducir su concentración en aguas residuales no son los más adecuados cuando las concentraciones de estos son bajas.

- La biosorción para la remoción de metales pesados se está aplicando cada vez con mayor diversidad en el tratamiento de aguas residuales y los residuos de origen agrícola e industrial están ocupando un importante rol en el desarrollo y expansión de este tipo de tratamiento.
- Los modelos matemáticos que tratan de describir los datos obtenidos en la biosorción de metales pesados en columnas de lecho fijo son varios, sin embargo el de Dosis –Respuesta es uno de los más difundidos por representar mejor las curvas de ruptura obtenidas con diversos adsorbentes.
- Las referencias bibliográficas encontradas no reflejan la modelación de curvas de ruptura de la biosorción de metales pesados en columnas de lecho fijo conectadas en serie.

CAPITULO II

CAPITULO II

Montaje a escala de laboratorio de un sistema de columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

En la búsqueda de alternativas económicamente sustentables y ecológicamente sostenibles para el proceso de remoción de metales pesados, en residuales líquidos, se procede a evaluar la sorción de Ni^{+2} y Cr^{+6} en presencia de bagazo de caña de azúcar sin modificar como biosorbente, en un sistema de dos columnas en un proceso continuo.

2.1- Montaje experimental.

2.1.1. Preparación del biosorbente.

Se emplearon muestras de bagazo provenientes del Central Azucarero ubicado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara. El material se sometió a un proceso de tamizado, utilizando una tamizadora Modelo MLW con un conjunto de tamices (Serie Tyler) siendo de interés la fracción entre 1 y 0,5 mm

La Figura 2.1 corresponde a una muestra de bagazo natural la cual fue sometida a un proceso de reducción de tamaño de partícula con el propósito de mejorarle su capacidad adsortiva.



Figura 2.1- Muestra de bagazo natural.

2.1.2. Preparación de las soluciones.

Se prepararon soluciones de Cloruro de Níquel (II) y dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), cinco litros de cada una con diferentes concentraciones y pH. Las soluciones de Cloruro de Níquel fueron preparadas a 20 ppm y 10 ppm y las de dicromato de potasio fueron preparadas a 10 ppm y 15 ppm con agua destilada. Para ajustar el pH inicial de las disoluciones se utilizaron cantidades adecuadas de disolución de HCl 0,1 M. El pH inicial

de las soluciones de dicromato de potasio fue fijado a dos y el de las soluciones de Cloruro de Níquel a cinco.

2.1.3. Influencia del pH en el proceso de biosorción continuo.

El diagrama de especiación en la Figura 2.2.a, muestra que la especie metálica Cr^{6+} en forma de HCrO_4^- : permanece estable en disolución hasta un valor de pH próximo a seis, a partir del cual, se transforman en CrO_4^{2-} . La Figura 2.2.b, muestra que a pH comprendido entre dos y seis la especie metálica Ni^{2+} permanece en disolución, a valores superiores de pH se transforma en $\text{Ni}(\text{OH})_2(\text{s})$ con gran tendencia a precipitar.

El estudio de pH-especiación sugiere trabajar en un rango de pH comprendido entre dos y cuatro para la especie Cr^{6+} y pH entre tres y seis para la especie Ni^{2+} , según las predicciones del software MEDUSA (Puigdomenech, I., 2001).

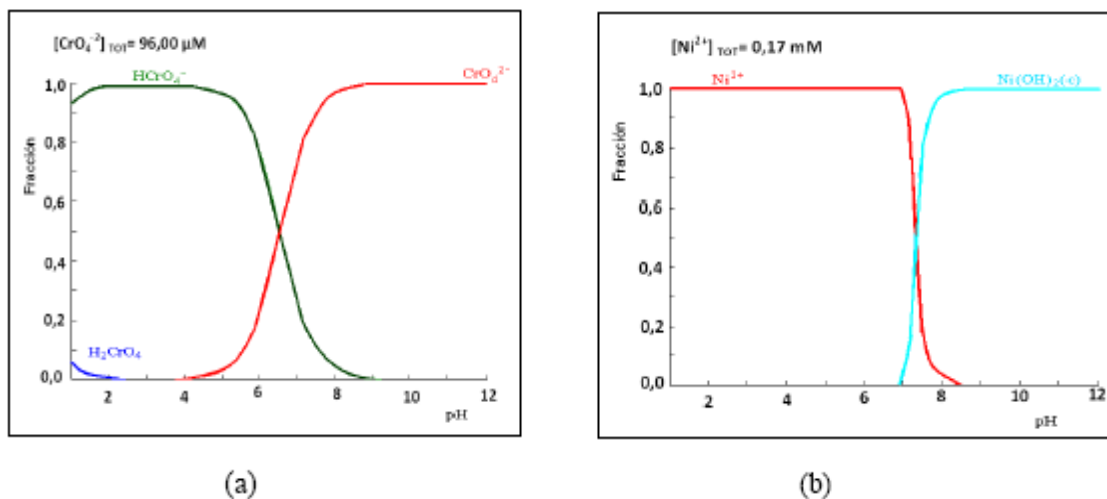


Figura 2.2 Diagrama de especiación en función del pH: (a) para iones Cr^{6+} 10 mg.L^{-1} ; (b) para iones Ni^{2+} 10 mg.L^{-1}

2.1.4 Influencia de flujo de alimentación en el proceso continuo

(Chu, K.H., 2004) señaló que el flujo de alimentación influye en el tiempo en el que se alcanza el punto de ruptura, un aumento de la razón de alimentación limita el proceso de biosorción porque disminuye el tiempo de contacto entre el metal y el biosorbente y el punto de ruptura se alcanza en un mínimo de tiempo.

Sin embargo, trabajar a flujos pequeños trae como consecuencia un largo período de tiempo del proceso, que no resulta factible en el tratamiento de grandes volúmenes de aguas residuales.

Por todo lo anterior y con los resultados de las pruebas hidráulicas previamente realizadas se planteó un flujo ascendente de $2 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, con el cual no se inunda la columna, no se fragmenta y el sistema tiene estabilidad hidráulica.

A partir de estos resultados se realizó un diseño experimental 2^k , utilizando el software STATGRAPHICS Plus v 5.0, para evaluar la influencia de las variables independientes sobre las variables respuestas (% de Remoción de Ni^{2+} y de Cr^{6+} con bagazo natural). Las variables de entrada ($k=2$) fueron: altura de la columna (masa de bagazo) y la concentración de las soluciones. Los valores establecidos para evaluar la variable respuesta del diseño de experimentos se muestran a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Diseño experimental para evaluar la influencia de las variables independientes sobre porcentaje de remoción de Ni^{+2} y Cr^{+6} . en las columnas de lechos fijos.

	Variables	Disolución de Ni^{2+}		Disolución de Cr^{+6}	
		Nivel		Nivel	
		-1	+1	-1	+1
X_1	Altura de relleno	10	15	10	15
X_2	Concentración	20	25	10	15

Existen otras variables que influyen el proceso de biosorción tales como tamaño de partícula, que se fijó en un valor estudiado en otros trabajos (Alomá, 2006.; Tenorio, 2006). Para su control se intenta que sean constantes y se verifican antes de empezar el ensayo y durante el mismo, para comprobar que están en los valores aprobados. El orden de realización de los experimentos fue aleatorio (es decir no se repitieron los ensayos consecutivamente) a fin de minimizar el riesgo en los resultados y proporcionar seguridad contra los efectos de las variables ocultas, se realizó el mismo número de réplicas de los experimentos.

2.1.5 Construcción de la matriz de diseño de los experimentos: el diseño factorial completo 2^2

La Tabla 2.2 y 2.3 muestran la matriz de experimentos que se obtiene combinando los dos niveles de los dos factores. Cada fila es un experimento y cada columna es un factor estudiado.

Tabla 2.2 Diseño factorial completo 2^2 y plan de experimentación para la remoción de Cr^{+6} en columnas de lecho fijo rellenas con bagazo de caña de azúcar

Exp.	Valores codificados		Plan de experimentación	
	X_1	X_2	Concentración(ppm)	Altura de relleno(cm)
1.	-1	+1	10	10
2.	-1	-1	10	15
3.	+1	-1	15	15
4.	+1	+1	15	10

Tabla 2.3 Diseño factorial completo 2^2 y plan de experimentación para la remoción de Ni^{+2} en columnas de lecho fijo con bagazo de caña de azúcar.

Exp.	Valores codificados		Plan de experimentación	
	X_1	X_2	Concentración(ppm)	Altura de relleno(cm)
1.	-1	+1	20	10
2.	-1	-1	20	15
3.	+1	-1	25	15
4.	+1	+1	25	10

2.1.6. Estudios en continuo.

Para la realización de los experimentos de biosorción de Ni^{+2} y Cr^{+6} en continuo, se realizó el montaje de la instalación experimental que se describe en la Figura 2.2.

2.1.6.1. Pruebas hidráulicas y selección de los parámetros de operación.

Previo a la realización de los ensayos de adsorción se realizan las pruebas hidráulicas, donde se cargan dos columnas con Bagazo Natural y se le hace circular agua con el propósito de determinar los flujos más adecuados para las condiciones de operación establecidas.

El flujo que se determinó en esta prueba, permite que la cama se mantenga estable, no fluidice, no se fragmente, y que no drene cuando cesa la operación, además de lograr una caída de presión adecuada. El caudal de alimentación seleccionado es de 2mL/min, según lo reportado.

Para la selección de la altura de la cama se toman en cuenta los criterios de diseño (Treybal, 1980), que plantean que pueden ser de seis veces o más el diámetro interior de la columna.

2.1.6.2. Cuantificación de las muestras.

Se realizaron las corridas comenzando a tomar las muestras de cada columna con una frecuencia seleccionada de 5 min la primeros 100 min del experimento y el resto cada 10 min, hasta lograr la saturación del biosorbente.

A las muestras tomadas se le determinó la concentración de níquel, con el objetivo de determinar el porciento de remoción de las columnas en serie, utilizando la técnica de absorción atómica, empleando para ello Pye Unicam SP9 PHILIPS Atomic Absorption Spectrophotometer. Chromium Analytical Line: 357,9 nm.

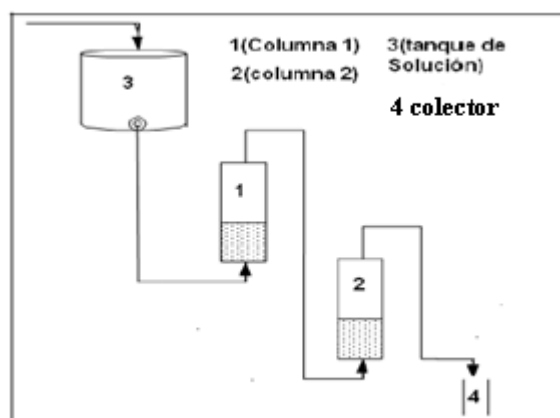


Figura 2.3 Esquema de Laboratorio de la remoción en continuo de iones de metales pesados de Ni^{+2} y Cr^{+6} utilizando bagazo natural como biosorbente.

2.2 Metodología

2.2.1. Estudio de remoción en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

Se prepararon soluciones de Cloruro de Níquel con una concentración inicial de 20 y 25 ppm, a pH= 5. Se cargaron dos columnas con 1 g de bagazo sin modificar cada una, se hizo pasar el flujo con un caudal de 2 mL/min en forma ascendente buscando las mejores condiciones de operación. El experimento tuvo una duración de 500 min, poniendo en marcha el cronómetro una vez que la disolución salió de la columna de relleno y se tomaron muestras continuas con la periodicidad establecida. Se realizó un seguimiento del pH y del caudal a la salida de ambas columnas, para comprobar que las condiciones previas establecidas se mantenían y así, asegurar la correcta realización del experimento. Se siguió el mismo procedimiento para las soluciones de Cr^{+6} con concentraciones de 10 y 15 ppm a pH=2.

Las muestras recogidas a la salida de las dos columnas se analizaron para determinar el contenido de los metales en estudio en solución.

2.2.2. Cálculo de la superficie de lecho no utilizada.

En estos sistemas, la concentración en la fase líquida y en la fase sólida varía tanto en el espacio como en el tiempo, por lo que el diseño y optimización de columnas de lecho fijo tiene especial dificultad si no se cuenta con un modelo de aproximación cuantitativo. En este sentido, el comportamiento dinámico de una columna de lecho fijo es descrito en términos de perfil concentración de efluente vs tiempo, lo que se conoce como curva de ruptura (Tenorio, 2006).

Una vez que se ha estudiado la biosorción de Ni^{+2} y Cr^{+6} utilizando dos columnas de lecho fijo en serie descrito en la Figura 2.2, se aplicaron varios modelos que permiten el ajuste de los datos experimentales de las curvas de ruptura y la determinación de los parámetros de cada uno de esos modelos. Los principales parámetros, se calculan por ecuaciones citadas en (Tenorio, 2006; Park et al., 2009) que definen el comportamiento del proceso de biosorción objeto de estudio.

El cálculo de la superficie de lecho no utilizada por la ecuación 2.1, constituye un método para evaluar la capacidad de adsorción de biosorbentes en columnas rellenas de flujo

continuo. En todos los casos la curva de ruptura permite establecer el punto de ruptura, representado en la figura 1 del capítulo anterior, el tiempo al que se alcanza el punto de ruptura indica el momento en cual es necesario detener la operación de las columnas y proceder al cambio del adsorbente. Es importante analizar que el punto de ruptura se puede fijar atendiendo a la concentración límite establecida por las normas medioambientales que rigen las concentraciones límites de vertimientos para iones de metales pesados, o por otras condiciones del proceso.

La Superficie del lecho no utilizada se calcula mediante la ecuación 2.1 que se muestra a continuación,

$$SNU=L_o \left(\frac{t_s-t_b}{t_s} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

Lo: representa la altura del lecho, [cm]

t_s : representa el tiempo al que se alcanza la saturación de la cama, [min]

t_b : representa el tiempo al que se alcanza el punto de ruptura de la cama, [min]

2.3. Criterios de escalado.

2.3.1. Metodología para el escalado de torres de adsorción.

Para aplicar el escalado a nivel de planta piloto se emplea la metodología propuesta por (Rodríguez, I., Blázquez, G., 2010) la cual se basa en tomar en consideración los parámetros de operación del modelo, en función de las mejores condiciones a la cual opera el mismo; la cual se describe en el capítulo I.

2.4. Conclusiones Parciales.

1. Para el funcionamiento adecuado de las columnas de adsorción rellenas con bagazo natural de caña de azúcar con arreglo en serie, se establecen como condiciones de operación los siguientes:

- Es importante trabajar en flujo ascendente, lo que facilita el proceso de biosorción de la especie metálica contenida en el efluente, garantizándose mayor contacto entre las fases.

- El pH de las disoluciones de Ni^{+2} debe fijarse en cinco y de las disoluciones Cr^{+6} a un valor de dos, ya que el bagazo de caña de azúcar tiene un punto de carga cero de 5, 5.
- 2. El punto de ruptura para el proceso se fija tomando en consideración la norma de vertimiento, ISO NC 27.
- 3. El cálculo de la SNU/equilibrio permite determinar la altura de cama no utilizada, la cual es proporcional al flujo de alimentación.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

Resultados a escala de laboratorio de la biosorción de Ni⁺² y Cr⁺⁶ en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar. Escalado del sistema y análisis económico preliminar.

3.1. Estudios de biosorción en columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

3.1.1. Pruebas hidráulicas.

Las condiciones de operación óptimas para el proceso de biosorción continuo con arreglo de dos columnas en serie, permitieron establecer los parámetros de operación que se describen en la Tabla 3.1, que se muestra a continuación.

Tabla 3.1. Parámetros de operación de las columnas de biosorción continuas.

Tamaño de partículas de bagazo de caña de azúcar: 1,0 - 0,5 (mm).		
Parámetros	Condición I	Condición II
Altura de la cama (cm)	15	20
Masa de bagazo (g)	1	1,5
Flujo (mL/min)	2	2

Las condiciones antes descritas, propician que la cama se mantenga estable, no fluidice al paso del residual, no se fragmente, que no drene cuando cesa la operación, y que se logre una caída de presión adecuada.

3.1.2. Curvas de ruptura: ajuste de modelos y determinación de parámetros cinéticos

3.1.2.1 Remoción de Cr⁶⁺

Con el objeto de obtener la curva de ruptura para la biosorción de Cr⁶⁺ con el biosorbente seleccionado, se realizan los experimentos con las condiciones adecuadas que permitan alcanzar, en la mayor parte de los casos, la curva de ruptura completa. Todos los experimentos se realizan a una temperatura constante de 25 °C y pH = 2.

A partir de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, se determina que las mejores condiciones de operación para lograr los mayores valores de retenido de Cr^{6+} son: caudal = 2 mL/min, $C_i = 15$ mg/L y masa de biosorbente = 1,5 g (altura de relleno = 20 cm).

La Figura 3.1 muestra las curvas de ruptura para la remoción de Cr^{6+} considerando solo la salida de la primera columna de la serie, Fig. 3.1 (a), y a la salida de la segunda columna de la serie Fig. 3.1 (b). Los parámetros de ambas curvas aparecen en la Tabla 3.2.

También se reportan los resultados obtenidos para las siguientes condiciones experimentales: caudal = 2 mL/min, $C_i = 10$ mg/L y masa de biosorbente = 1 g (altura de relleno = 15 cm).

Los datos obtenidos experimentalmente fueron procesados y simulados con una programación en MATLAB 2007a.

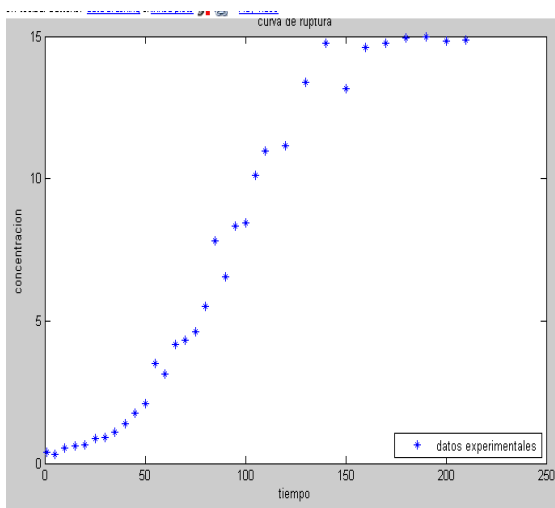


Figura 3.1(a)

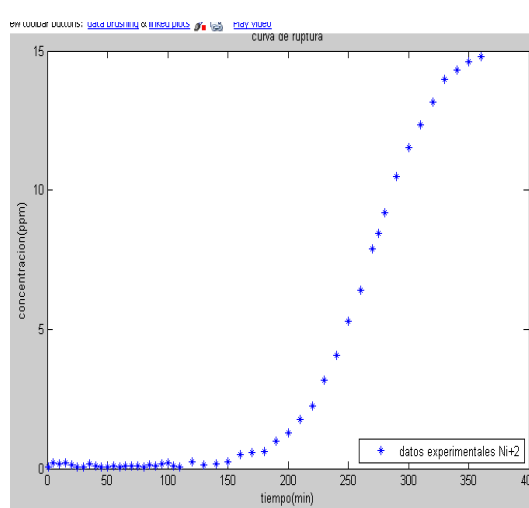


Figura 3.1 (b)

Figura 3.1 Resultados experimentales con la curva de ruptura obtenida para la remoción de Cr^{6+} a una concentración de 15 ppm y altura de relleno de 20 cm a la salida de la primera columna (fig. 3.1 (a)) y a la salida de la segunda columna (fig. 3.1 (b)).

3.1.2.2 Remoción de Ni^{2+}

Todos los experimentos se realizan a una temperatura constante de 25 °C y pH=5.

De igual forma que para el Cr^{6+} , partir de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, se determina que las mejores condiciones de operación para lograr los

mayores valores de retenido de Ni^{2+} son: caudal = 2 mL/min, $C_i = 25$ mg/L y masa de biosorbente = 1,5 g (altura de relleno = 20 cm).

También se reportan los resultados obtenidos para las siguientes condiciones experimentales: caudal = 2 mL/min, $C_i = 15$ mg/L y masa de biosorbente = 1,5 g (altura de relleno = 15 cm). Esta experimentación se realizó para corroborar el efecto de la altura o masa de relleno.

El tiempo de saturación se determina cuando C/C_i es superior a 0,9, lo que significa que en la corriente de salida el efluente tiene una concentración que es el 90 por ciento de la concentración de la corriente de entrada a la columna, como es usual en este tipo de investigaciones.

Los datos obtenidos experimentalmente fueron procesados y simulados con una programación en MATLAB 2007a.

La Figura 3.2 muestra las curvas de ruptura para la remoción de Ni^{2+} considerando solo la salida de la primera columna de la serie, Fig. 3.2 (a), y a la salida de la segunda columna de la serie Fig. 3.2 (b). Los parámetros de ambas curvas aparecen en la Tabla 3.2.

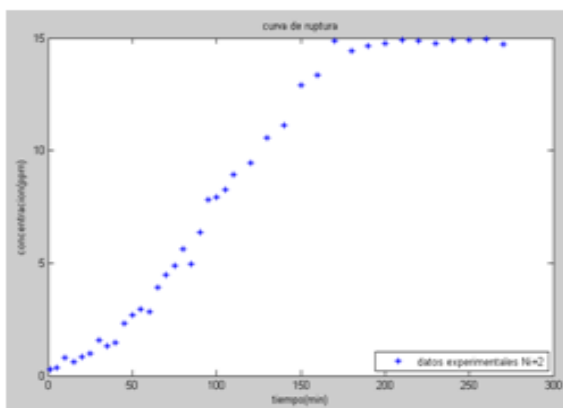


Figura 3.2(a)

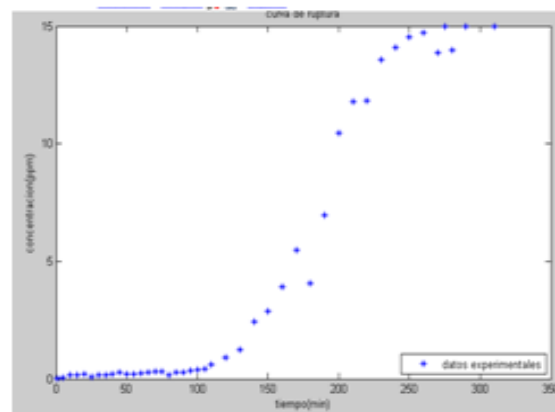


Figura 3.2 (b)

Figura 3.2 Resultados experimentales con la curva de ruptura obtenida para una concentración de 25 ppm de Ni^{2+} y altura de relleno de 15 cm, a la salida de primera columna (fig. 3.2 (a)) y a la salida de segunda columna (fig. 3.2 (b)).

Tabla 3.2 Parámetros característicos de las curvas rupturas a la remoción de Ni²⁺ y Cr⁶⁺ en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar conectadas en serie

Especie metálica	m _o	C _o ppm	C ₁ ppm	C ₂ ppm	L cm	ts ₁ min	ts ₂ min	t _b min	%Remo 1	%Remo 2	SNU1 (cm)	SNU2 (cm)
Cr ⁺⁶	1	10	1,72	0,62	15	115	290	45	82,8	93,8	9,13	12,67
	1,5	10	1,94	0,57	20	180	330	45	80,6	94,3	15	17,27
	1	15	1,97	0,44	15	170	210	20	86,86	97,06	13,23	13,57
	1,5	15	1,75	0,27	20	210	310	45	88,33	98,2	15,71	17,09
Ni ⁺²	1	15	2,32	0,04	15	270	360	45	84,53	99,73	12,5	13,12
	1,5	15	1,26	0,11	20	310	460	120	91,6	99,26	12,25	14,78
	1	25	1,91	0,08	15	95	250	20	92,36	99,69	11,84	13,8
	1,5	25	1,79	0,09	20	180	330	70	92,84	99,64	12,22	15,75

Donde: m_o es la masa de biosorbente, C_o: la concentración inicial, C₁: la concentración en el punto de ruptura de primera columna, C₂: la concentración a la salida de columna 2 en el tiempo de ruptura para la primera columna, L: Longitud de columna. Ts₁: tiempo de saturación de la primera columna. Ts₂: tiempo de saturación de la segunda columna. T_b: punto de ruptura. SNU: altura de columna no utilizada.

Si se comparan los valores de correspondientes al porcentaje de remoción de ambos metales en la tabla 3.2, se observa que el porcentaje de metal retirado es muy cercano al 100% en la segunda columna. En la primera columna se alcanzan valores de remoción de alrededor del 90%, cumpliéndose con la norma de vertimiento según la NC 27. El porcentaje de remoción en la primera columna cumple con la norma de vertimiento lo que confirma que la primera columna rellena con bagazo es suficiente para el uso industrial para la norma establecida. La segunda columna en serie es capaz de biosorber la cantidad de metal pesado que no fue retirado en la primera columna. Esto garantiza que más allá del cumplimiento de la norma de vertimiento según la NC 27 se logre un vertimiento de aguas con una menor carga contaminante de estos residuos peligrosos a los cuerpos receptores, lo que ayuda a mitigar los efectos nocivos de los metales estudiados al medio ambiente.

En la Tabla 3.2 se puede observar que tanto los tiempos de saturación, como de ruptura dependen de las condiciones de operación, o sea de la masa de biosorbente utilizada y de la concentración inicial del metal analizado, entre otras variables.

3.1.2.1 Modelo de Adams-Bohart para dos columnas en serie

Como se ha comentado anteriormente, este modelo es usado fundamentalmente para describir la parte inicial de la curva de ruptura. A partir de la ecuación 1.8 y mediante regresión lineal se obtienen los parámetros del modelo y de ajuste que se muestran en la Tabla 3.3 y 3.4 para cada una de las concentraciones y con cada una de las alturas de relleno utilizadas.

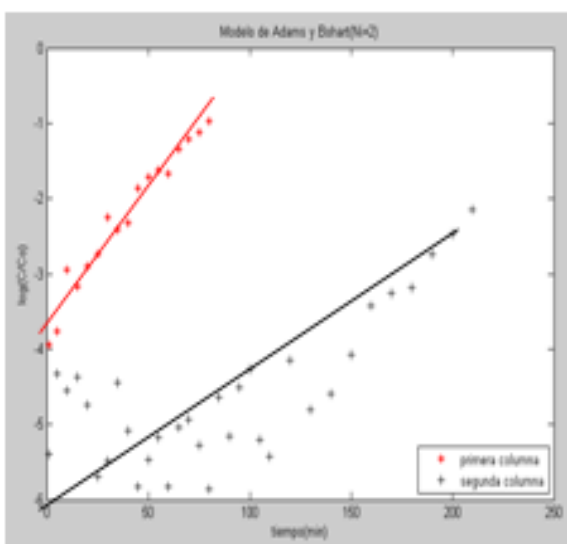


Figura 3.3(a)

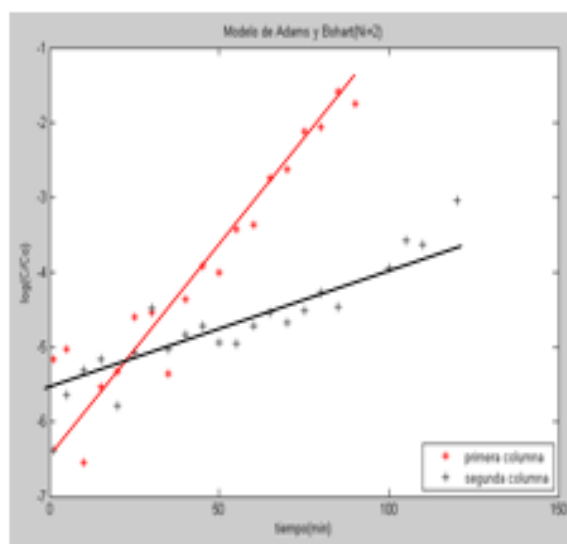


Figura 3.3 (b)

Figura 3.3 Ajuste de modelo de Adams y Bohart con los datos experimentales de Cr^{+6} para la concentración de 15 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna y segunda columna (fig. 3.3 (a)) y para la concentración de 10 ppm y altura de 20 cm a la salida de primera y a la salida de segunda columna (fig. 3.3 (b)).

Tabla 3.3 Parámetros de modelo de Adams y Bohart obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Cr^{6+} obtenidos en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	kab	No	R ²
1	15	10	0,00612	122,21	92,81
2	15	10	0,00256	127,02	95,26
1	20	10	0,00275	146,64	97,11
2	20	10	0,00584	126,51	99,61
1	15	15	0,00144	129,9	79,51
2	15	15	0,002133	116,92	79,9
1	20	15	0,002424	118,56	96,94
2	20	15	0,001313	129,04	79,24

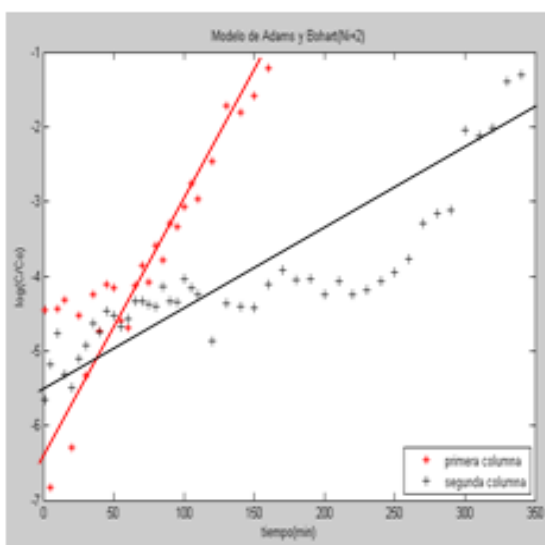


Figura 3.4(a)

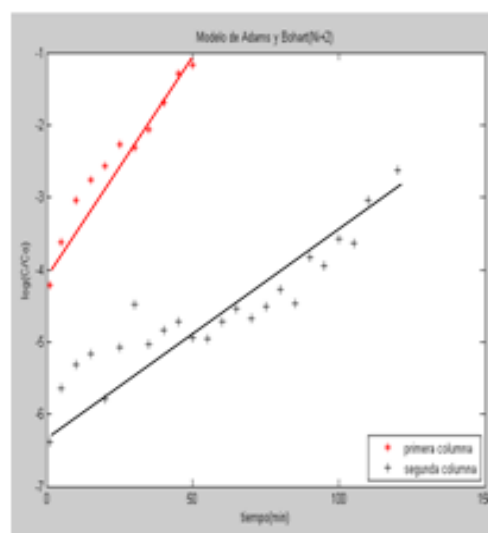


Figura 3.4 (b)

Figura 3.4 Ajuste de modelo de Adams y Bohart con los datos experimentales de Ni^{+2} para la concentración de 15 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna y segunda columna (fig. 3.4 (a)) y para la concentración de 25 ppm y altura de 20 cm a la salida de primera y a la salida de segunda columna (fig. 3.4 (b))

Tabla 3.4 Parámetros de modelo de Adams y Bohart obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Ni²⁺ obtenidos en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	K _{ab}	No	R ²
1	15	15	0,00234	117,07	95,62
2	15	15	0,00105	423,00	75,93
1	20	15	0,00174	183,07	82
2	20	15	0,0005	274,6	75,42
1	15	25	0,002248	129,25	91,79
2	15	25	0,00088	251,03	85
1	20	25	0,00196	175,92	89,64
2	20	25	0,0005	331,51	79,24

El modelo de Adams-Bohart reproduce de forma aceptable la parte inicial de la curva de ruptura en la mayoría de los casos analizados. La capacidad de sorción volumétrica no disminuye al aumentar la altura de relleno para todos los casos; así mismo, la constante cinética, K_{ab}, aumenta con la altura de relleno lo que indica que el proceso de biosorción se produce de forma más rápida. Estos resultados son similares a los obtenidos por otros investigadores (Han et al., 2009; Pakshirajan y Swaminathan, 2009; Saha et al., 2010).

3.1.2.2 Modelo de Thomas para dos columnas en serie

Como se ha comentado anteriormente, este modelo es uno de los más utilizados para describir el comportamiento del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo. A partir de la ecuación 1.15 y mediante regresión lineal se obtienen los parámetros del modelo y de ajuste que se muestran en las tablas 3.5 y 3.6 para cada una de las concentraciones y con cada una de las alturas de relleno utilizadas.

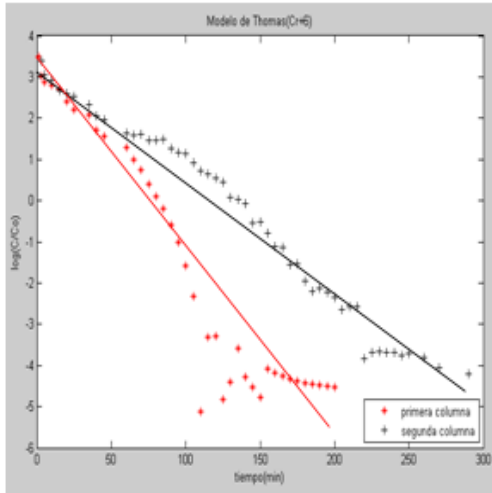


Figura 3.5(a)

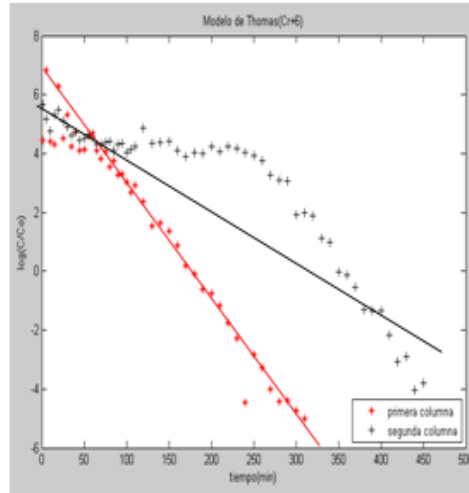


Figura 3.5 (b)

Figura 3.5 Ajuste de modelo de Thomas con los datos experimentales de Cr^{+6} para la concentración de 10 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna y segunda columna (fig. 3.5 (a)) y para la concentración de 15 ppm y altura de 20 cm a la salida de primera y a la salida de segunda columna (fig. 3.5 (b))

Tabla 3.5 Parámetros del modelo de Thomas obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Cr^{6+} en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	Kth	q_0	R^2
1	15	10	4,1	1,1	92,31
2	15	10	2,9	1,22	97,68
1	20	10	3,79	1,11	96,76
2	20	10	2,59	1,11	98,14
1	15	15	2,43	11,93	91,79
2	15	15	3	2,09	85
1	20	15	3,2	1,72	89,64
2	20	15	2,44	1,71	79,24

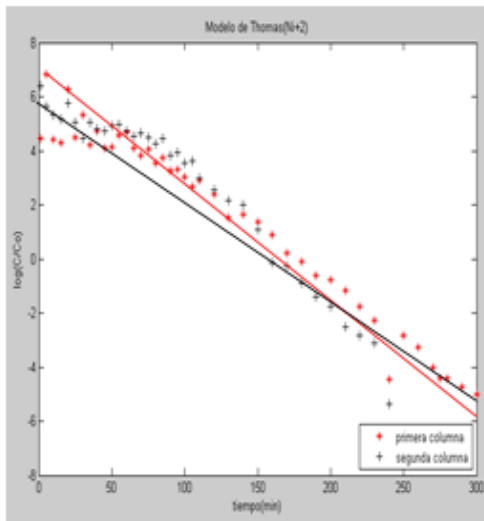


Figura 3.6 (a)

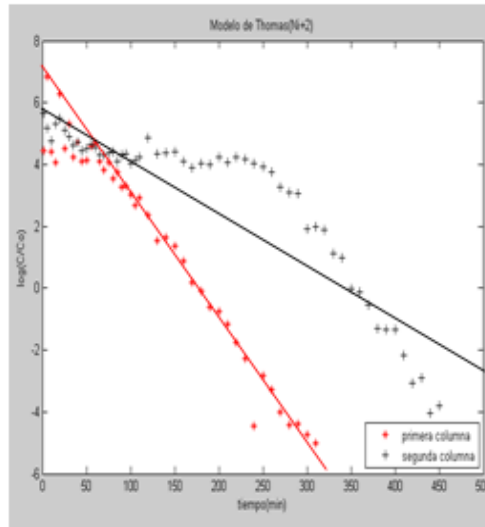


Figura 3.6 (b)

Figura 3.4 Ajuste de modelo de Thomas con los datos experimentales de Ni^{2+} para la concentración de 25 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna y segunda columna (fig. 3.3 (a)) y para la concentración de 15 ppm y altura de 15 cm a la salida de primera y a la salida de segunda columna (fig. 3.3 (b))

3.6 Parámetros de modelo de Thomas obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Ni^{2+} en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	Kth	qo	R ²
1	15	15	2,33	2,95	95,96
2	15	15	1,76	3,96	89,21
1	20	15	2,41	3,42	96,42
2	20	15	1,13	3,66	80,67
1	15	25	1,6	4,33	94,06
2	15	25	1,76	4,01	92,9
1	20	25	2,28	3,74	96,7
2	20	25	1,4	4,03	76,58

El modelo de Thomas reproduce de forma aceptable los resultados experimentales para todos los casos, como se pone de manifiesto por los altos valores de R^2 obtenidos. Los resultados encontrados con la aplicación del modelo de Thomas por otros investigadores son muy diversos. Así, Vázquez et al. (2009), estudiando la optimización de la biosorción de plomo, cobre y zinc con cáscara de castaña indican que el modelo de Thomas no reproduce de forma aceptable la curva de ruptura, encontrándose diferencias entre los valores de la capacidad de retención obtenidos de forma experimental y los calculados con el modelo. Han et al. (2009), estudian la adsorción de cobre en columna de lecho fijo utilizando una zeolita recubierta de óxido de hierro e indican que el modelo de Thomas reproduce la curva de ruptura obteniéndose que los valores de q_0 son prácticamente independientes de la altura de lecho utilizado y diferentes a los obtenidos de forma experimental. Mata et al. (2009) encuentran que el modelo de Thomas reproduce de forma aceptable las curvas de ruptura obteniéndose unos valores de la capacidad de retención experimentales y calculados muy similares.

3.1.2.4 Modelo de Yoon y Nelson para dos columnas en serie

El modelo de Yoon y Nelson es matemáticamente equivalente al modelo de Thomas. A partir de la ecuación 1.14 y mediante regresión lineal usando la programación en MATLAB2007a se obtienen los parámetros del modelo y de ajuste que se muestran en las tablas 3.7 y 3.8 para cada uno de los metales y con cada una de las alturas de relleno utilizadas.

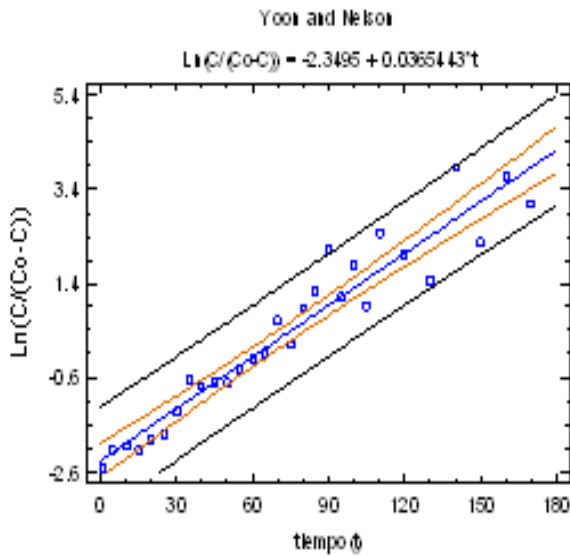


Figura 3.7 (a)

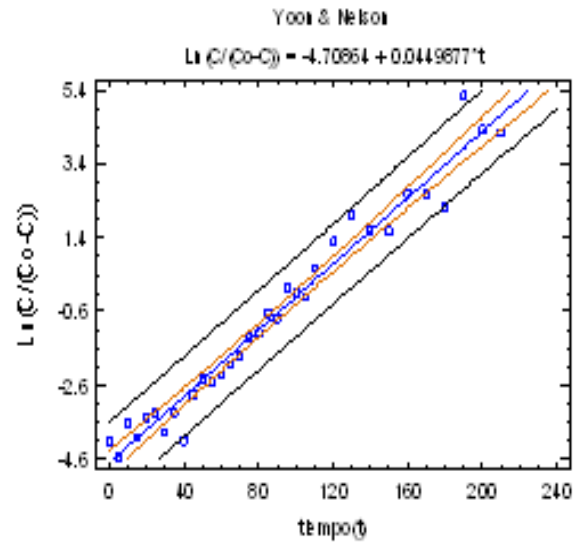


Figura 3.7 (b)

Figura 3.7 Ajuste de modelo de Yoon y Nelson con los datos experimentales de Cr^{6+} para la concentración de 10 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna (fig. 3.7 (a)) a la salida de segunda columna (fig. 3.7 (b))

Tabla 3.7 Parámetros de modelo de Yoon y Nelson obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Cr^{6+} obtenidos en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

columna	Altura(cm)	Conc.(ppm)	K_{YN}	tao	R^2
1	15	10	0,041	55,29	92,31
2	15	10	0,029	122,2	97,68
1	20	10	0,038	83,48	96,76
2	20	10	0,026	166,56	98,14
1	15	15	0,0365	64,36	91,79
2	15	15	0,045	104,62	85
1	20	15	0,048	86,45	89,64
2	20	15	0,0367	172,72	79,24

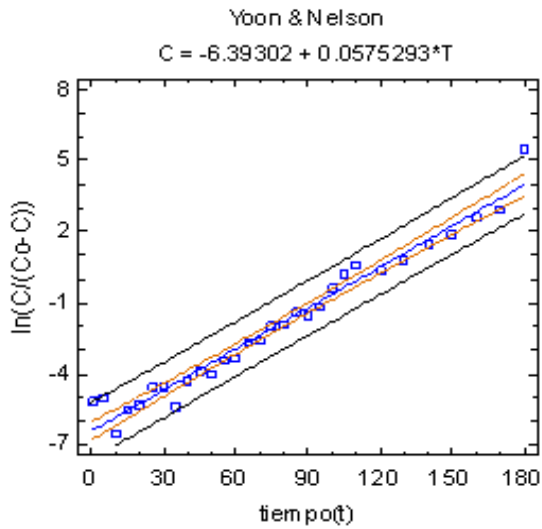


Figura 3.8(a)

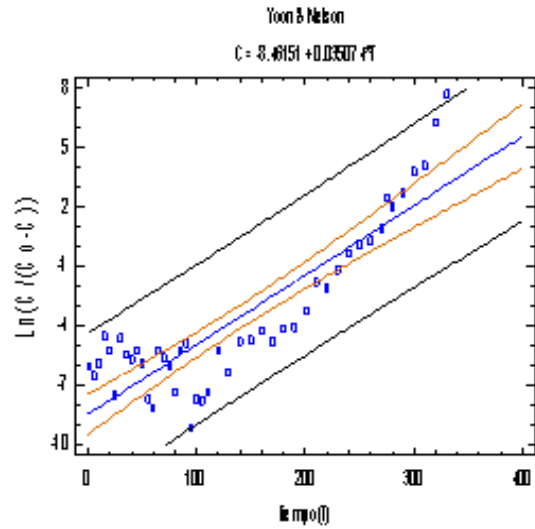


Figura 3.8 (b)

Figura 3.8 Ajuste de modelo de Yoon y Nelson con los datos experimentales de Ni^{2+} para la concentración de 25 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna (fig. 3.8 (a)) y a la salida de segunda columna (fig. 3.8 (b))

Tabla 3.8 Parámetros de modelo de Yoon y Nelson obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Ni^{2+} obtenidos en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	K_{YN}	tao	R^2
1	15	15	0,035	98,65	95,96
2	15	15	0,029	264,34	89,21
1	20	15	0,0362	171,38	96,42
2	20	15	0,017	366,17	80,67
1	15	25	0,0402	86,64	94,06
2	15	25	0,044	160,4	92,9
1	20	25	0,057	112,15	96,7
2	20	25	0,035	241,75	76,58

Este modelo al ser matemáticamente igual al de Thomas, ha dado lugar a los mismos resultados de ajuste, por tanto, reproduce de forma aceptable las curvas de ruptura. No obstante, los valores del tiempo requerido para retener el 50 % del metal inicial, τ , son muy similares a los obtenidos experimentalmente para todos los biosorbentes, lo que coincide que lo encontrado por diversos investigadores estudiando diferentes sistemas biosorbente-metal en columna de relleno (Oliveira et al., 2010; Madhavi et al., 2011).

3.1.2.5 Modelo de Dosis-Respuesta para dos columnas en serie

A partir de la ecuación 1.18 y mediante regresión no lineal usando el software MATLAB2007a se obtienen los parámetros del modelo de Dosis-Respuesta y de ajuste que se muestran en las tablas 3.9 y 3.10 para cada uno de los metales y con cada una de las alturas de relleno utilizadas.

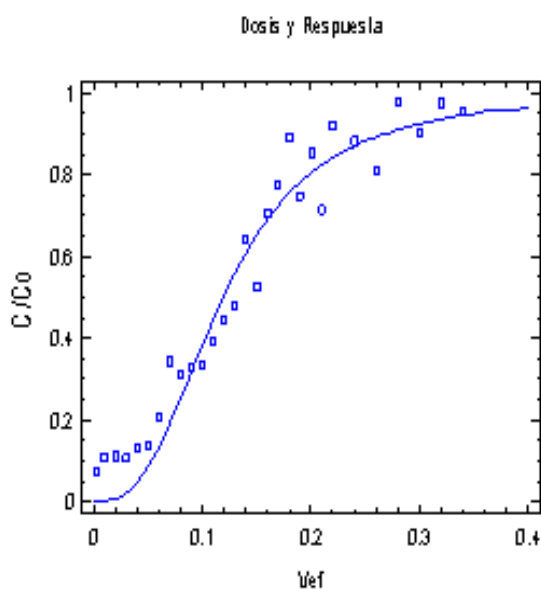


Figura 3.9 (a)

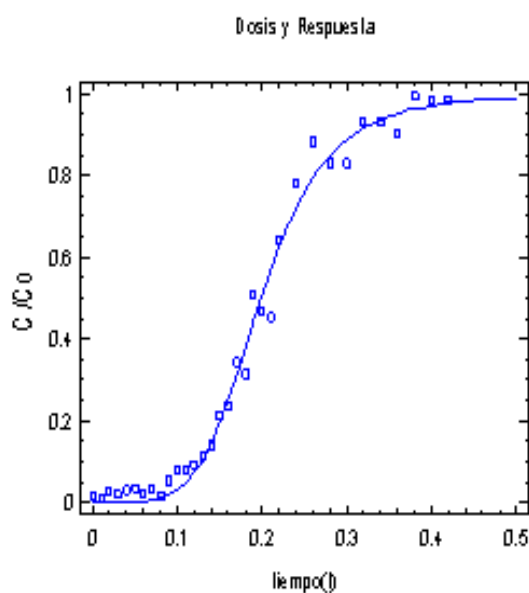


Figura 3.9 (b)

Figura 3.9 Ajuste de modelo de Dosis y Respuesta con los datos experimentales de Cr^{+2} para la concentración de 15 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna (fig. 3.9 (a)) y a la salida de segunda columna (fig. 3.9 (b))

Tabla 3.9 Parámetros de modelo de Dosis y Respuesta obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Cr^{+6} obtenidos en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar.

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	a	qo(mg/g)	R ²
1	15	10	3,31	1,05	95,95
2	15	10	5	1,29	97,67
1	20	10	4,51	1,12	97,29
2	20	10	4,43	1,11	97,09
1	15	15	2,73	1,78	92,07
2	15	15	5,06	1,83	99,43
1	20	15	4,36	1,75	99,21
2	20	15	8,77	1,86	98,21

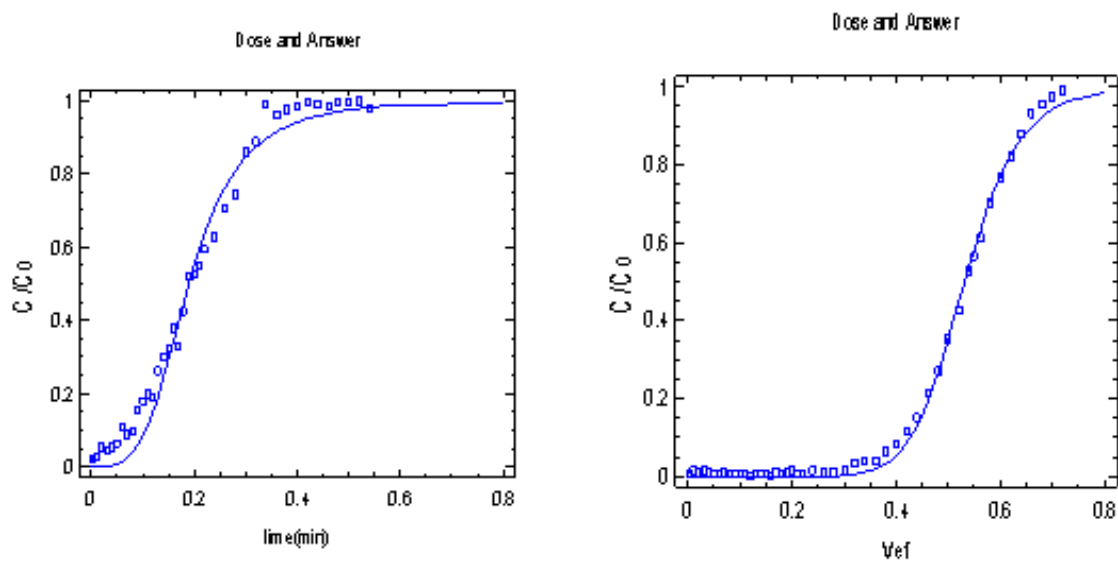


Figura 3.10 Ajuste de modelo de Dosis y Respuesta con los datos experimentales de Cr^{+2} para la concentración de 15 ppm y altura de relleno de 15 cm a la salida de primera columna (fig. 3.10 (a)) y a la salida de segunda columna (fig. 3.10 (b))

Tabla 3.10 Parámetros de modelo de Dosis y Respuesta obtenidos experimentalmente para el ajuste de los datos experimentales de la remoción de Ni²⁺ obtenidos en dos columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar

columna	Altura(cm)	Conc. (ppm)	a	qo(mg/g)	R ²
1	15	15	2,91	2,33	97,64
2	15	15	10,1	3,98	99,7
1	20	15	7,71	3,52	99,48
2	20	15	15,2	3,66	99,54
1	15	25	4,11	3,11	98,45
2	15	25	9,77	3,9	99,58
1	20	25	5,99	3,6	98,41
2	20	25	15,3	4,14	99,21

Los resultados muestran que este modelo reproduce de forma aceptable las curvas de ruptura para todos los metales estudiados y para las dos alturas de relleno utilizadas (valores de R² > 0,90). No obstante, como se han indicado anteriormente, este modelo reproduce en general bastante bien las curvas de ruptura completas, pero, en algunos casos, es difícil relacionar los parámetros de ajuste con las condiciones de operación, por lo que es de poca utilidad para modelar el comportamiento de la columna y, por tanto, para la realización de un escalado de la misma. Estos resultados son similares a los obtenidos por otros investigadores (Vijayaraghavan y Prabu, 2006; Vijayaraghavan, 2008; Vijayaraghavan y Yun, 2008; Senthilkumar et al., 2010).

3.2 Escalado del sistema de remoción de metales pesados con columnas rellenas con bagazo a escala de planta piloto

Para realizar el escalado de la propuesta a escala de planta piloto de las columnas de adsorción rellenas con Bagazo Natural, se toma como referencia la columna a escala de laboratorio aplicando la metodología establecida, la nomenclatura utilizada se refiere en el epígrafe 2.3 del capítulo II.

3.2.1. Cálculo de la altura de la cama del prototipo.

Cuando el modelo es 20 cm altura de la cama.

$$\frac{H_i P}{H_i m} = \frac{d_{cp}}{d_{cm}} \quad (3.1)$$

Sustituyendo en la Ecuación 3.3; y conociendo que el diámetro del modelo es 1 cm y del prototipo es 10 cm.

$$H_i P = \frac{10}{1} * 20 = 200 \text{ cm} = 2 \text{ m}$$

3.2.2. Cálculos de la caída de presión (Bueno, 1997).

Para cuando la altura del lecho en el modelo es de 200 cm.

$$Q = 2,0 \text{ mL/min. } (3,33 \text{E-}8 \text{ m}^3/\text{s})$$

$$\frac{\Delta P}{H_L} = \frac{150 \left(1 - \frac{e^{-2}}{e^3}\right) * \mu * v_o}{\psi^2 * dp^2} \quad (\text{Ec.3.2})$$

$$u_o = \frac{3,33 * 10^{-8}}{3,14 * 10^{-4}} = 4,24 * 10^{-4} \text{ m/s}$$

Luego:

$$\Delta P = \frac{150 * (1 - 0,5899)^2}{0,5899^3} * \frac{0,8 * 10^{-3} \text{ Pa.s} * 1,05 * 10^{-4} \text{ m/s}}{0,5^2 * (1,5 * 10^{-2})^2 \text{ m}} * 0,2 = 0,0367 \text{ Pa}$$

Para cuando la altura del lecho en el prototipo es de 200 cm.

$$\frac{\Delta P_m}{H_m} = \frac{\Delta P_p}{H_p} \text{ (Relación de Escala)} \quad (3.3)$$

entonces:

$$\frac{0,0367}{20 * 10^{-2} \text{ m}} = \frac{\Delta P_p}{200}$$

Luego:

$$\Delta P_p = 36,7 \text{ Pa}$$

Tabla 3.11. Parámetros de operación según la relación de escala.

Para soluciones de Ni ⁺² y Cr ⁺⁶		
	Modelo	Piloto
H _L (m)	0,2	2
d _c (m)	0,01	0,1
ΔP (Pa)	0,0367	36,7
Q(m ³ /s)	3,33E-8	2,998E-5

En la Tabla 3.11 se resumen los resultados del escalado del modelo de columnas rellenas con bagazo de caña de azúcar natural, utilizadas en el laboratorio. Además se determinó, mediante la relación de escala establecida, la caída de presión que proporciona el lecho para las alturas que se plantean, tal como se reporta en la tabla 3.11. Las mismas tienen valores bajos lo cual puede atribuirse a la baja densidad y alta porosidad del relleno.

3.2.3 Dimensionamiento del sistema de bombeo

Desde la planta de producciones mecánicas es necesario bombear agua residual hasta la planta de tratamiento, por lo cual hace necesario la selección de una bomba centrífuga de acero inoxidable mediante el cálculo de sus parámetros fundamentales según la metodología propuesta por (Rosabal Vega.J.M, 2006):

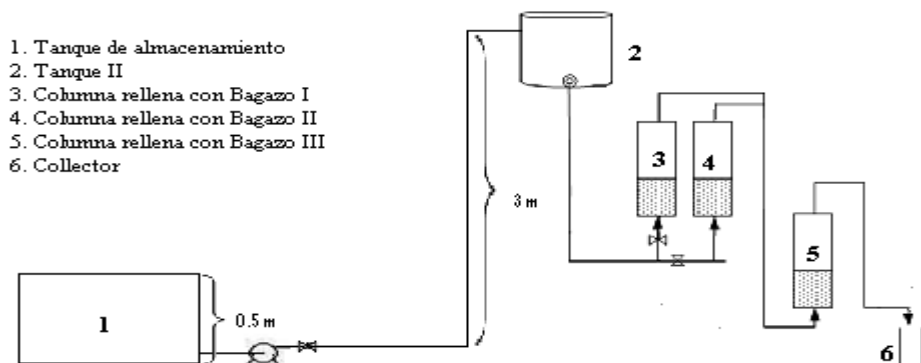


Figura 3.3 Representación simplificada del sistema de bombeo hasta el tanque de alimentación a las columnas

Datos del sistema de bombeo.

La caída de presión en las dos columnas es de 73.4 Pa, pues la altura del tanque debe ser aproximadamente,

$$\Delta P = \rho * g * (h - 2)$$

Pues la altura de tanque

$$h = 2,0074 \text{ m} \approx 3 \text{ m}$$

Distancia entre tanques: 10 m

Flujo requerido: 2,998E-2 L/s.

Tubería de PVC DN=3/4 in. =26,67 mm

Tuberías	Accesorios
Succión	1 codo de 90°
Descarga	4 codos de 90° , 1 válvula de cuña (compuerta abierta)

Determinación de los parámetros de la bomba:

Datos:

DN= ¾ in= 26,67 (Tabla 10: (Rosabal Vega.J.M, 2006))

Longitud (L) =10 m

$$Q = 2,998 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Datos del fluido: { $\mu = 0,01 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ y $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ }

Ecuación de Bernoulli

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{\Delta v^2}{2g} + h_P \text{ donde}$$

$\frac{\Delta P}{\rho g} = 0 \rightarrow$ La presión en la superficie del líquido en ambos tanques es la atmosférica

($P = 1 \text{ atm}$).

$\frac{\Delta v^2}{2g} = 0 \rightarrow$ No existe velocidad en la superficie del líquido en ambos tanques ($v = 0$).

Luego $\Delta Z = 2.5 \text{ m}$, siendo finalmente $H = 2,5 \text{ m} + h_P$

Cálculo de h_P

$$hP = (f \frac{L}{D} + \sum K) \frac{v^2}{2g}$$

1-Cálculo de v

$$Q = v \cdot A$$

1.1-Cálculo de A

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{3,14 \cdot (26,67 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2}{4}$$

$$A = 5,58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Entonces $v = \frac{Q}{A}$

$$v = 0,054 \text{ m/s}$$

2-Cálculo de f

❖ f está en función de Re y [e/D]

2.1-Cálculo del Re

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad Re = 4779,56$$

2.2-Cálculo de [e/ D]

Se asumió un valor de e = 0,2 mm (Tabla 9, (Rosabal Vega.J.M, 2006)) para tuberías nuevas.

Luego, [e/D] = 0,0033

Desde la figura 3.9 se obtiene, f = 0,035

3-Cálculo de los coeficientes de resistencias locales (K) en las tuberías

Tabla 3.12. Datos del sistema de tuberías.

Accesorios	K	Valores
• 1 válvula de cuña	1*(0,17)	0,17
• 4 codos de 90°	4*(0,75)	3
• Entrada	0,5	0,50
• Salida	1	1.
	$\sum K$	4,67

$$\text{Luego } h_P = (0.033 * 10 \text{ m} / (60,45 * 10^{-3} \text{ m}) + 4.67) * \frac{0,35^2}{2 * 9,8}$$

$$h_P = 0,06 \text{ m}$$

Cálculo de H

$$h_P = (f * \frac{L}{D} + \sum K) \frac{v^2}{2g}$$

$$H = 2,563 \text{ m}$$

Cálculo del consumo de potencia de la bomba:

$$N = \frac{\rho g H Q}{1000 \eta}, \text{ asumiendo un valor de } \eta = 65\% \text{ para el sistema motor-bomba,}$$

$$N = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 39,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 2.56 \text{ m} * 2.998 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{1000 * 0.65} = 0,0344 \text{ kW}$$

Características del motor de la bomba requerida (Tabla 14, (Rosabal Vega.J.M, 2006))

Motor monofásico: 110/220 V Potencia nominal: 0,37 kW

Velocidad: 1800 rpm Frecuencia: 60 Hz

3.3 Cálculo de la masa de bagazo que se necesita en la planta piloto.

Cuando la altura del lecho es de 2m.

$$\rho_{BSM} = 0,3333 \text{ g/cm}^3 \text{ (333,3 Kg/m}^3\text{); calculado experimentalmente.}$$

$$V_{BSM} = A * h \text{ (Ec.3,8)}$$

$$A = \pi * \frac{d^2}{4} = 7,85 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$h = 2 \text{ m}$$

Sustituyendo en (Ec.3.8)

$$V_{BSM} = 7.85 * 10^{-3} \text{ m}^2 * 2 \text{ m}$$

$$= 0,0157 \text{ m}^3$$

$$m_{BSM} = 5,24 \text{ kg}$$

3.4 Análisis económico preliminar:

El análisis económico de una producción industrial, constituye un estudio complejo de cada uno de los eslabones que también contribuyen a la actividad económico-productiva, siendo una de las funciones de la organización y dirección científica de la producción.

Dicho análisis, permite determinar si la inversión proyectada es capaz de satisfacer los requerimientos que la han originado y si es o no, económicamente factible, valorando objetivamente los resultados. (González Suarez. E., González Rodríguez. V., 1987).

Por todo ello, se procede a realizar la valoración económica de la planta piloto que se muestra en la figura 3.3, teniendo en cuenta que todas las columnas son iguales.

3.4.1 Estimación de los costos

3.4.1.1 Costo Total de Inversión.

Para el estimado del costo total de inversión, se determinó el costo del equipamiento utilizado, el cual tiene una gran incidencia en este, específicamente en los elementos que contiene la inversión fija, de esta manera se tiene que:

Costo de Inversión = Inversión Fija + Inversión de Trabajo

Inversión Fija = Costos Directos + Costos Indirectos

3.4.1.2-Costo del equipamiento

Equipos	Costo(\$)	Nº equipos	Total (\$)
Tanque de acero inoxidable	581,48	1	581,48
Columna de material plástico. (L= 2,00 m)	13	3	39
Válvulas.	0,45	4	1,8
Codos. (90 ⁰)	0,77	13	10, 01
T	0,62	2	1,24
Tuberías (3/8")	1,50/ m	20 m	30
Bombas centrífugas	682,85	1	682,85
Total			1346,38

El estimado del costo total de la inversión se realizó sobre la base del costo total del equipamiento, para lo cual, se estimaron los aspectos que para la planta inciden en la Inversión fija y la Inversión de trabajo.

3.4.1.2 Inversión fija

Costos directos

Indicadores	Fórmula	Costo(\$)
Equipamiento	100%	1346,38
Instalación de equipos	35% del costo de equipamiento	471,23
Instrumentación y control	6% del costo de equipamiento	80,78
Tuberías	20% del costo de equipamiento	269,27
Instalaciones eléctricas	7% del costo de equipamiento	94,24

Costos indirectos

Indicadores	Formula	Costos(\$)
Supervisión e ingeniería	5% de la inversión fija	113,1
Gastos de construcción	1% de la inversión fija	22,62
Gastos de puesta en marcha	10% de la inversión fija	226,19
Imprevistos	10% de la inversión fija	226,19

Inversión fija = costos directos +costos indirectos =2850 \$

Inversión de trabajo (IW)= 10% de inversión total IT

Inversión total (IT)= inversión fija + 0,1 de IT

IT = 3166,66\$

Inversión total del proyecto IT = 3166,66\$

3.4.1.3 Costos Totales de Tratamiento

Costos Totales de tratamiento (CTP) = Costos de tratamiento (CT) + Gastos Generales (GG)

Costos de fabricación (CF) = Costos Directos (CD) + Costos Fijos (CF) + Costos Indirectos (CI)

3.4.1.4 Costo de la materia prima:

Los costos de los reactivos fueron estimados (2011-2012):

Materia Prima	Precio	Cantidad	Costo
Bagazo natural	0, 02 \$/kg	11,5 kg/día	0,23 \$/día
Costo Total de las materias primas		84 \$/año	

3.4.1.5 Costo de la mano de obra

Cantidad de obreros: 1

Costo= 1 obrero*\$350/obrero-mes*1mes/24días = 14,58 \$/día = 4375 \$ /año

3.4.1.6-Costo de la electricidad

El costo de la electricidad es 0,09\$/kW-h

La potencia requerida para la planta es: 0,37 kW, entonces

Costo=0,37 kW*0,09 \$/kW-h*8h/día=3,14 \$/día = 941,76 \$/año

3.4.1.7 Costo de tratamiento

Los resultados del cálculo de los costos de tratamiento son los siguientes:

Costos de tratamiento	Costos directos de producción	Indicador	Fórmula	Costo(\$/año)
		Materias primas	-	84
		Mano de obra	-	4375
		Supervisión	0,1*Mano de obra	437,5
		Requerimientos de electricidad,	-	941,76
		Mantenimiento y reparaciones	0,05*IF	142,5
		Suministros	0,005*IF	14,5
		Laboratorio	0,1*Mano de obra	1750
	Costos fijos	Depreciación	IT/(Vida útil)	264
	Seguros	0,004*IF	11,4	
	Impuestos	0,1*IF	285	
	Costos externos	Otros costos	0,5*(M.Obra+Sup.+ Mtto)	2477,5
	Costos de tratamiento			10783,16

3.4.1.8 Gastos generales

$$GG = 0,1*CTP \text{ pero, } CTP = CF + GG = CF + 0,1*CTP$$

Entonces CTP= 11981,28 \$/año

3.4.1.9 Calculo de beneficios y externalidades

	Beneficios	\$/año
a.	No pagar multas por no cumplir NC27:1997	2250
b.	No contaminar suelo y manto freático	2000
c.	Total	4250

	Externalidades	\$/año
a.	Lesiones en piel y mucosas y afecciones respiratorias(medicamentos)	3747
b.	Sarna y bronquitis (medicamentos)	3594,32
c.	Consulta médica	1025
	Total	8366,32

3.4.1.10 Ganancia del proceso

$$G = V.P - CTP$$

$$G = 12616,32 \text{ \$/año} - 11981,28 \text{ \$/año}$$

$$G = 635,04 \text{ \$/año}$$

3.5.4. Indicadores de rentabilidad VAN, TIR, PRD.

Una valoración de la factibilidad de la inversión se realizó sobre la base del cálculo de los indicadores dinámicos VAN (valor actual neto), TIR (tasa de rendimiento interna) y el PRD (período de recuperación al descontado), tomando una tasa de interés del 12 %. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.13.

Tabla 3.13. Valores de los indicadores de factibilidad de la variante en estudio.

Indicadores	Valor(\$)
Valor actual neto. VAN [\$]	15669,31
Tasa de Rendimiento Interna. TIR [%]	110
Plazo de recuperación al descontado. PRD [años]	1

Los valores reflejados en la Tabla 3.9 indican la factibilidad de la tecnología propuesta por ser el VAN mayor que cero y la recuperación efectuarse en un periodo de 1 año (Figura 1, Anexo 16).

3.4 Comparación de precio de tratamiento con otros adsorbentes

Cantidad a tratar (Q)= $2,998 \cdot 10^{-5} \cdot 3600 \cdot 8 \text{ m}^3/\text{día} = 0,86 \text{ m}^3/\text{día}$

Para tratar un efluente de cromo con 15 ppm de concentración inicial;

Cantidad de níquel en el efluente a remover = $(0.86 \cdot 1000 \cdot 15) \text{ mg} = 12900 \text{ mg}$

Tabla 3.13 Comparación de costo de materia prima en relación de su capacidad máxima de sorción para Cr^{+6} .

	Sorbentes	q_{max} (mg/g)	Cantidad utilizada (Kg/día)	Precio/Kg (MN)	Costo/día (MN)
1.	Bagazo natural	1,14	11,5	0,02	0,23
2.	Bagazo modificado*	1,68	7,68	4,54	34,86
3.	Zeolita**	13,5	0,96	3,625	3,47

*cantidad de agua tratada= $0,86 \text{ m}^3$

* (Alomá, Inés de la C., 2011).

** [Wenxian Kexing Activated Carbon Factory](http://www.alibaba.com/kexing) (www.alibaba.com/kexing natural zeolita filtro de los medios de

comunicación para tratamiento de agua - spanish.alibaba.com.htm)

Conclusiones parciales.

1. Los estudios a nivel de laboratorio demuestran que es posible utilizar el bagazo para remover los metales estudiados y cumplir con la norma cubana de vertimiento.
2. De todos los modelos estudiados para la biosorción de metales pesados con bagazo natural el que mejor de ajusta es el de Dosis-Respuesta.
3. El análisis de factibilidad económica preliminar demuestra que el proceso es factible desde este punto de vista.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1. En las pruebas hidrodinámicas realizadas en el sistema de columnas en serie instalado se demuestra que el flujo de trabajo que resulta adecuado para el funcionamiento del mismo es de 2 mL/min.
2. En el caso del Cr^{6+} las mejores condiciones de remoción se obtienen para una altura del lecho de 20 cm y una concentración inicial de 15 ppm, encontrándose que en una columna el porcentaje de retirado es de 88,33 mientras que para dos columnas en serie se alcanza un 98,2 %.
3. Cuando se trabaja con soluciones de Ni^{2+} las mejores condiciones de remoción se obtienen para una altura de lecho de 20 cm y una concentración inicial de 25 ppm, de modo que en una columna el porcentaje de retirado es de 92,84 y para dos columnas en serie se alcanza un 99,64 %.
4. Ambos procesos logran remover los metales pesados para cumplir con la NC 27 sobre vertimiento de residuales contaminados a cuerpos receptores, lo que demuestra la posibilidad del uso en sistemas continuos del bagazo natural como biosorbente para los metales estudiados.
5. El modelo de Dosis-Respuesta representa adecuadamente los procesos que se realizan en una columna, y describe correctamente el comportamiento de las curvas de ruptura, que para en el caso del Cr^{6+} se alcanza un ajuste de 99,2 y para el Ni^{2+} de 98,45.
6. Para los procesos que se realizan en dos columnas en serie, el modelo de Dosis-Respuesta es también el que mejor representa la biosorción de Cr^{6+} y Ni^{2+} y describe correctamente el comportamiento de las curvas de ruptura, con coeficientes de correlación de superiores al 99% en ambos casos.
7. El análisis de la inversión para la construcción de una Planta Piloto para la biosorción de Cr^{6+} y Ni^{2+} de aguas residuales industriales demuestra su factibilidad económica con los siguientes indicadores: VAN 15669,31, TIR 110 y un período de recuperación de la inversión de un año.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Ampliar el estudio realizado con dos columnas en serie rellenas con bagazo de caña de azúcar a aguas residuales que contienen estos metales y donde además pueden aparecer interferencias de otros metales y de materia orgánica.
2. Gestionar proyectos empresariales o de otro tipo para construir y evaluar el comportamiento del proceso a nivel de planta piloto.
3. Estudiar alternativas para la reutilización y(o) disposición final del bagazo agotado.
4. Proponer un modelo matemático modificado que se ajuste a la utilización del bagazo natural como biosorbente de metales pesados y en el cual se incluyan otras variables físicas no contempladas en los modelos reportados por la literatura.

Bibliografía Referenciada

1. ADAMS, E. Q. B., G, S 1920. Some aspects of behavior of charcoal with respect to Chlorine. U.S. BUREAU OF CHEMISTRY. 523-544.
2. ALIMOHAMADI, M. A., G. Y KESHTKAR, A. 2005. Pb (II) and Cu (II) biosorption on *Rhizopus arrhizus*. Modeling mono and multi-component systems. Minerals Engineering, 18, 1325-1329.
3. ALOMÁ, I. D. L. C., RODRÍGUEZ, I., CURBELO, A., SARDIÑAS, R., CORTÉS, M., 2008. Remoción de cromo y níquel de soluciones acuosas utilizando bagazo de caña de azúcar como biosorbente. Revista Centro Azúcar 35.
4. ALOMÁ, V. I. C. 2006. Evaluación de la operación de Adsorción de metales pesados empleando columnas rellenas con bagazo de caña químicamente modificado y propuesta de escalado a nivel de planta piloto. . Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas".
5. ATKINSON, B. W. B., F. Y KASAN, H.C 1998. Considerations for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents,. Water S.A, 24, 151-224.
6. BABEL, S. Y. K., T.; 2003. Low-costs adsorbent for heavy metals uptake from contaminated water: a review. Journal of Hazardous Materials, 97, 219-243.
7. BAILEY, S. E. O., T.J. BRICKA, R.M. Y ADRIAN, D.D.; 1999. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. Water Research, 33, 2469-2479.
8. BASSO, M. C. & CUKIERMAN, A. L. 2004. Biosorción de especies metálicas a partir de aguas contaminadas empleando recursos lignocelulósicos.
9. BAYTAK, S. Y. T., A.R.; 2005. The use of *Agrobacterium tumefaciens* immobilized on Amberlite XAD-4 as a new biosorbent for the column preconcentration of iron(III), cobalt(II), manganese(II) and chromium(III). Talanta, 64(4), 938-945.
10. BRADY, J. M. T., J.M. Y ROUX, J.-C.; 1999. Continuous fixed bed biosorption of Cu²⁺ ions: application of a simple two parameters mathematical model. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 74, 71-77.

11. BRIERLEY, C. L. 1990. Bioremediation of metal-contaminated surfaces and ground waters. *Geomicrobiology Journal*, 8, 201-230.
12. BUENO, J. 1997. Contaminación e Ingeniería Ambiental. Contaminación de las aguas. III.
13. CHEN, J. P. C., W.R. Y HSU, R.C. 1996. Biosorption of copper from aqueous solutions by plant root tissues. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 85, 459-473.
14. CHEN, J. P. W., L. Y ZOU, S.-W. 2007. Determination of lead biosorption properties by experimental and modeling simulation study. *Chemical Engineering Journal*, 131, 209-215.
15. CHONG, S. H. J., H.; CHUNG, H.; LEE, M.Y. Y YANG, J.; 1998. Removal of heavy metals from aqueous solution by apple residues. *Process Biochemistry*, 33, 205-211.
16. CHU, K. H. 2003. Prediction of two-metal biosorption equilibria using a neural network. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 3(1), 119-127.
17. CURBELO, T. 1997. Características de la aplicación del escalado en la Ingeniería Química.
18. DAVIS, J. A. V., B Y MUCCI, A. 2003. A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae,. *Water research*, 37, 4311-4330.
19. DEMIRBAS, E. K., M.; SENTURK, E Y OZKAN, T 2004. Adsorption kinetics for the removal of Chromium (VI) ions from aqueous solutions on the activated carbon prepared from agricultural wastes. . *Water S.A*, 30, 533-539.
20. ESPOSITO, A. P., F.; LODI, A.; SOLICIO, C. Y VEGLIO, F. 2001. Biosorption of heavy metals by *Sphaerotilus natans* : an equilibrium study at different pH and biomass concentrations. *Hydrometallurgy* 60, 129-141.
21. FIOL, N. V., I.; MARTÍNEZ, M.; MIRALLES, N.; POCH, J. Y SERAROLS, J. 2006. Sorption of Pb(II), Ni(II), Cu(II) and Cd(II) from aqueous solution by olive stone waste, . *Separation and Purification Technology*, 50, 132-141.
22. GAVRILESCU, M. 2004. Removal of heavy metals from the environment by biosorption. *Engineering in Life Sciences*, 4, 219-232.

23. GHARAIBEH, S. H. A.-E.-S. R., W.Y. Y AL-KOFAHI, M.M. 1998. Removal of selected heavy metals from aqueous solutions using processed solid residue of olive mill products. *Water Research*, 32, 498-502.
24. GONG, R. D., Y.; LIU, H.; CHEN, Q. Y LIU, Z. 2005. Lead biosorption and desorption by intact and pretreated *Spirulina maxima* biomass. *Chemosphere*, 58, 125-129.
25. GUPTA, G. Y. K., M. 2001. Toxicity identification of pocomoke River Porewater. *Chemosphere*, 33(5).
26. HOLAN, Z. R. Y. V., B 1994. Biosorption of lead and nickel by biomass of marine algae, *Biotechnology and Bioengineering*, 43, 1001-1011.
27. KHALID, N. R., A.; AHMAD, S.; KIANI, S.N. Y AHMED, J. 1998. Adsorption of cadmium from aqueous solutions on rice husk. *Radiochimica Acta*, 83, 157-162.
28. KRATOCHVIL, D. 1997. A study of the metal biosorption process utilizing *Sargassum* seaweed biomass. Ph.D, Montreal University.
29. KRATOCHVIL, D. Y. V., B. 1998. Advances in the biosorption of heavy metals. *Trends in Biotechnology*, 16, 291-300.
30. KURNIAWAN, T. A. G., G.Y.S.; LO, W.-H. Y BABEL, S.; 2006. Physico-chemical techniques for wastewater laden with heavy metals,. *Chemical Engineering Journal*, 118, 83-98.
31. KURNIAWAN, T. A. Y. B., S. 2003. A research study on Cr (VI) removal from contaminated wastewater using low-cost adsorbents and commercial activated carbon,. 2, 1110-1117.
32. LEUSCH, A. H., Z.R. Y VOLESKY, B. 1996. Solution and particle effects on the biosorption of heavy metals by seaweed biomass. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 61, 39-45.
33. NAIYA, T. K. B., A.K. Y DAS, S.K.; 2008. Adsorption of Pb (II) by sawdust and neem bark from aqueous solutions,. *Environmental Progress*,, 27(3), 313-328.
34. NIU, H. Y. V., B. 2001. Gold adsorption from cyanide solution by chitinous materials. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 76(3), 291-297.

35. P.N.L, A. M. A. P. J. P. C. M. R. J. W. Y. L. 2011. Biosorption of Cu (II) onto agricultural materials from tropical regions. *Journal Chemical Technologies Biotechnology*, 86, 1184-1194.
36. PAGNANELLI, F. M., S.; VEGLIO, F. Y TORO L 2004. Modeling of acid base properties of natural and synthetic adsorbent materials used for heavy metal removal from aqueous solutions. *Chemosphere*, 54, 905-915.
37. PAGNANELLI, F. M., S.; VEGLIO, F. Y TORO L 2005. Biosorption of protons and heavy metals onto olive pomace: modeling of competition effect. *Water research*, 39, 1639-1651.
38. PAGNANELLI, F. P., M, P.; TORO, L; TRIFONI, M. Y VEGLIO, F. 2000. Biosorption of heavy metal ions on *Arthrobacter sp.*; biomass characterization and biosorption modeling,. *Environmental science and Technology*, 34, 2773-2778.
39. PARK, D. Y., Y.-S.; LEE, D.S. Y PARK, J.M. 2004. Optimum condition for the removal of Cr(VI) or total Cr using dried leaves of *Pinus densiflora*,. *Desalination*, 271, 309-311.
40. PATENTE CUBANA, C. 1996. Adsorbente para la eliminación de Hg (II), Pb, Cd, Cu y Ag de aguas contaminadas.
41. PATENTE CUBANA, C. A. 1987. Procedimiento de depuración de iones metálicos de aguas residuales.
42. PÉREZ MARÍN, L. 1983. Solicitud de patente. 06, 25.
43. PETERS, K. D. & TIMMERHAUS, K. D. 1970. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, Edición Revolucionaria
44. RASUL MALIKA, U. & MOOSA HASANYB, S. 2005. Muhammad Sadiq Subhania Sorptive potential of sunflower stem for Cr (III) ions from aqueous solutions and its kinetic and thermodynamic profile.
45. REDDAD, Z. G., C.; ANDRÈS, Y.; RALET, M.C.; THIBAUT, J.F. Y LECLOIREC, P.; 2002. Ni (II) and Cu(II) binding properties of native and modified sugar beet pulp,. *Carbohydrate Polymers*., 49, 23-31.
46. RODRÍGUEZ RICO, I. 2003. Tecnología para la obtención de un sorbente de metales pesados a partir del bagazo de caña.

47. ROSABAL VEGA, J. M. (ed.) 2006. Hidrodinámica y separaciones mecánicas, La Habana: Científico-técnica.
48. RUIZ, E. 2012. Aprovechamiento de Residuos Vegetales para la eliminación de cobre presente en medios acuosos mediante biosorción. Departamento de Ingeniería Química, Ph.D.
49. S.C., G. 1965. Lead poisoning and the fall of Rome. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 7, 53-60.
50. SENTHILKUMAR, R. V., K.; THILAKAVATHI, M.; IYER, P.V.R. Y VELAN, M.; 2006. Seaweeds for the remediation of wastewaters contaminated with zinc(II) ions. *Journal of Hazardous Materials*, 136(3), 791-799.
51. SENTHILKUMAR, R. V., K.; JEGAN, J. Y VELAN, M 2010. Batch and column removal of total chromium from aqueous solution using *Sargassum polycystum*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 29(3), 334-341.
52. SINGH, R. C., R.; KUMAR, R.; BISHNOIA, K.; BHATIA, D.; KUMAR, A.; & BISHNOI, N. R. Y. S., N. 2010. Biosorption optimization of lead (II), cadmium (II) and copper (II) using response surface methodology and applicability in isotherms and thermodynamics modeling, *Journal of Hazardous Materials*, 174.
53. SOLICIO, C. L., A.; CONVERTI, A.; BROGHI, M.D 2001. The effect of acid-pretreatment on the biosorption of chromium (III) by *Aphaerotilus natans* from industrial waste waters. *Water research*, 34(12), 3171-3178.
54. STENZEL, M. H. 1993. Remove organic by activated carbon adsorption,. *Chemical Engineering Progress*, 89(4), 36-43.
55. TEIXEIRA TARLEY, C. R. & ZEZZI ARRUDA, M. A. 2004. Biosorption of heavy metals using rice milling by-products. Characterization and application for removal of metals from aqueous effluents.
56. TEIXEIRA TARLEY, C. R. & ZEZZI ARRUDA, M. A. 2004-19. Biosorption of heavy metals using rice milling by-products. Characterization and application for removal of metals from aqueous effluents.
57. TENORIO, G. 2006. Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna. Universidad de Granada.

58. TENORIO, G. 2006. Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna, Ph.D, Universidad de Granada.
59. TREYBAL, R. E. 1980. Operaciones de Transferencia de Masa.
60. VEGLIÒ, F. Y. B., F. 1997. Removal of metals by biosorption: a review. *Hydrometallurgy*, 44(3), 301-316.
61. VIEIRA, R. H. S. F. Y. V., B.; 2000. Biosorption: a solution to pollution? *International Microbiology*, 3, 17-24.
62. VIJAYARAGHAVAN, K. & PRABU, D. 2006. Potential of *Sargassum wightii* biomass for copper (II) removal from aqueous solutions: application of the different mathematical models to batch and continuous biosorption data, *Journal of Hazardous Materials*.
63. VÍLCHEZ, R. 2005. Eliminación de metales pesados en aguas mediante sistemas de lechos sumergidos: estudio microbiológico en las biopelículas. Ph.D, Universidad de Granada.
64. VILLAESCUSA, I. F., N.; MARTÍNEZ, M.; MIRALLES, N.; POCH, J. Y SERAROLS, J 2004. Removal of copper and nickel ions from aqueous solutions by grape stalks wastes. *Water Research*,, 38, 992-1002.
65. VOLESKY, B. 1986-4. Biosorbent Materials, *Biotechnoi. Bioeng Symp.*
66. W.-C., C. J.-H. E. A. V. T. C.-H. Y. H. 2010. Copper cation transport and scaling of ionic exchange membranes using electro dialysis under electroconvection conditions, *Journal of Membrane Science*, 361(1-2), 56-62.
67. WILLIAMS, C. K. A., D. Y EDYVEAN, R.G.J.; 1998. Comparison between biosorbentes for removal of metal ions from the aqueous solutions. *Water research*, 32(1), 216-226.
68. YAN, G. Y. V., T. Y CHEM, M. 2001. A new model for heavy metal removal in a biosorption column,. *Adsorption Science and Technology*, 19(1), 25-43.
69. ZHANG, Y. Y. B., C. 2005. A comparison of the properties of polyurethane immobilized Sphagnum moss, seaweed, sunflower waste and maize for the biosorption of Cu, Pb, Zn and Ni in continuous flow packed columns. *Water research*, 40(4), 778-798.

70. ZHENG, J.-C. F., H.-M.; LAM, M.H.-W.; LAM, P.K.-S.; DING, Y.-W. Y YU, H.-Q. 2009. Removal of Cu (II) in aqueous media by biosorption using water hyacinth roots as a biosorbent material, *Journal of Hazardous Materials*, 171, 780-785.
71. ZHENG, W. L., X.-M.; WANG, F.; YANG, Q.; DENG, P. Y ZENG, G. 2008. Adsorption removal of cadmium and copper from aqueous solution by areca a food waste. *Journal of Hazardous Materials*, 157, 490-495.
72. ZOUBOULIS, A. I. T., E.G.; MATIS, K.A. Y HANCOCK, I.C 1999. Removal of toxic metals from aqueous mixtures. Part 1: Biosorption, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 74, 429-436.

ANEXOS

Anexo 1

Tabla 1 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicada a disoluciones

homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial- 10 ppm

Masa de Bagazo = 1 g

Columna 1.

		Adams y Bohart	Thomas model	Yoon and Nelson	Dose and Answer
Cn	T	$\text{Ln}(C/\text{Co})$	$\text{Ln}((\text{Co}/C)-1)$	$\text{Ln}(C/(\text{Co}-C))$	C/Co
0,29	1	-3,529	3,49972698	-3,4997269	0,02932
0,46	3	-3,0793313	3,03225017	-3,0322501	0,04599
0,53	5	-2,9327574	2,87803726	-2,8780372	0,05325
0,56	10	-2,8696284	2,81123628	-2,8112362	0,05672
0,63	15	-2,7633515	2,69819414	-2,6981941	0,06308
0,83	20	-2,4843468	2,39728452	-2,3972845	0,08338
0,99	25	-2,3053890	2,20033957	-2,2003395	0,09972
1,11	35	-2,1947177	2,07662089	-2,0766208	0,11139
1,52	40	-1,8807218	1,715281	-1,715281	0,15248
1,72	45	-1,7586342	1,56955387	-1,5695538	0,17228
2,14	60	-1,5392124	1,29771399	-1,2977139	0,21455
2,68	65	-1,3151651	1,00260274	-1,0020274	0,26843
3,19	70	-1,1406671	0,75602455	-0,7560245	0,31951
4,00	75	-0,9140682	0,40175815	-0,4017585	0,40089
4,73	80	-0,7484273	0,10766388	-0,1076638	0,47311
5,50	85	-0,5961475	-0,2044289	0,20442898	0,55093
6,40	90	-0,44475702	-0,57962016	0,57962016	0,64098
7,33	95	-0,30957328	-1,01378384	1,01378384	0,73376
8,31	100	-0,184945	-1,59379954	1,59379954	0,83115
9,09	105	-0,09444256	-2,31217061	2,31217061	0,90988
9,94	110	-0,00595771	-5,12008843	5,12008843	0,99406
9,64	115	-0,03582409	-3,31116924	3,31116924	0,96481

Anexo 2

Tabla 2 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicada a disoluciones homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial- 10 ppm

Masa de Bagazo= 1 g

Columna (1+2)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
Cn	T	$\ln(C/Co)$	$\ln((Co/C)-1)$	$\ln(C/(Co-C))$	C/Co
0,0231	3	-6,07050775	6,06819508	-6,06819508	0,00231
0,0581	5	-5,14817471	5,14234776	-5,14234776	0,00581
0,135	10	-4,30506559	4,29147364	-4,29147364	0,0135
0,1451	15	-4,23291721	4,21830091	-4,21830091	0,01451
0,1899	20	-3,96384275	3,94467013	-3,94467013	0,01899
0,145	25	-4,23360663	4,21900048	-4,21900048	0,0145
0,3948	35	-3,23196106	3,19168059	-3,19168059	0,03948
0,3426	40	-3,37377679	3,33891615	-3,33891615	0,03426
0,6271	45	-2,76923435	2,70447181	-2,70447181	0,06271
0,6423	60	-2,74528489	2,67889933	-2,67889933	0,06423
0,8818	65	-2,4283751	2,33606242	-2,33606242	0,08818
1,2796	70	-2,05603756	1,91911758	-1,91911758	0,12796
1,6781	75	-1,78492289	1,60122839	-1,60122839	0,16781
1,864	80	-1,67986038	1,47357394	-1,47357394	0,1864
1,8497	85	-1,68756163	1,48303127	-1,48303127	0,18497
2,1907	90	-1,51836397	1,2710942	-1,2710942	0,21907
2,3567	95	-1,44532276	1,17656711	-1,17656711	0,23567
2,4418	100	-1,40984962	1,12989759	-1,12989759	0,24418
2,8316	105	-1,26174317	0,92884055	-0,92884055	0,28316
3,2486	110	-1,12436096	0,73152576	-0,73152576	0,32486
3,4484	115	-1,06467474	0,64179894	-0,64179894	0,34484

3,6477	120	-1,00848826	0,55472012	-0,55472012	0,36477
3,8871	125	-0,94492171	0,45273791	-0,45273791	0,38871
4,7791	130	-0,73833285	0,08841756	-0,08841756	0,47791
4,9216	135	-0,70895141	0,03136257	-0,03136257	0,49216
5,1722	140	-0,65928696	-0,06890725	0,06890725	0,51722
6,3437	145	-0,4551229	-0,55101049	0,55101049	0,63437
6,2768	150	-0,4657248	-0,52227678	0,52227678	0,62768
6,8985	155	-0,3712811	-0,79941813	0,79941813	0,68985
7,5373	160	-0,28272107	-1,11860572	1,11860572	0,75373
7,5692	165	-0,27849771	-1,13586696	1,13586696	0,75692
8,2719	170	-0,18972086	-1,56584169	1,56584169	0,82719
8,2203	175	-0,19597839	-1,53016189	1,53016189	0,82203
8,7643	180	-0,13189844	-1,95904904	1,95904904	0,87643
9,0072	185	-0,10456084	-2,2052503	2,2052503	0,90072
8,9373	190	-0,11235156	-2,12942069	2,12942069	0,89373
9,0187	195	-0,10328489	-2,21817726	2,21817726	0,90187
9,1296	200	-0,09106321	-2,35032428	2,35032428	0,91296
9,341	205	-0,06817178	-2,65144506	2,65144506	0,9341
9,2862	210	-0,07405567	-2,5656819	2,5656819	0,92862
9,2961	215	-0,07299014	-2,58071394	2,58071394	0,92961
9,7901	220	-0,02121342	-3,84249572	3,84249572	0,97901
9,756	225	-0,02470261	-3,68846953	3,68846953	0,9756
9,7518	230	-0,02513321	-3,67097229	3,67097229	0,97518
9,7549	235	-0,02481537	-3,68385871	3,68385871	0,97549
9,7557	240	-0,02473336	-3,68721003	3,68721003	0,97557
9,7705	245	-0,02321745	-3,75121989	3,75121989	0,97705
9,7603	250	-0,02426196	-3,70669028	3,70669028	0,97603
9,7848	260	-0,02175493	-3,81701761	3,81701761	0,97848
9,83	270	-0,01714616	-4,05739578	4,05739578	0,983
9,8544	290	-0,01466704	-4,2148102	4,2148102	0,98544

Anexo 3

Tabla 3 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicada a disoluciones homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm

Masa de biosorbente = 1 g

Columna = 1

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
Cn	T	$\ln(C/C_0)$	$\ln((C_0/C)-1)$	$\ln(C/(C_0-C))$	C/Co
1,11	1	-2,60369019	2,52680914	-2,52680914	0,074
1,57	5	-2,25697458	2,14641539	-2,14641539	0,10466667
1,68	10	-2,18925641	2,07047287	-2,07047287	0,112
1,58	15	-2,25062535	2,13932128	-2,13932128	0,10533333
1,97	20	-2,03001666	1,88922085	-1,88922085	0,13133333
2,07	25	-1,98050159	1,83200159	-1,83200159	0,138
3,12	30	-1,5702172	1,33702331	-1,33702331	0,208
5,16	35	-1,06711362	0,64551913	-0,64551913	0,344
4,66	40	-1,16903475	0,79700442	-0,79700442	0,31066667
4,92	45	-1,11474167	0,71724473	-0,71724473	0,328
5,02	50	-1,09462027	0,68715316	-0,68715316	0,33466667
5,84	55	-0,9433194	0,45011538	-0,45011538	0,38933333
6,68	60	-0,80893221	0,21954427	-0,21954427	0,44533333
7,19	65	-0,73535903	0,08271379	-0,08271379	0,47933333
9,66	70	-0,44005655	-0,592768	0,592768	0,644
7,89	75	-0,64245407	-0,10409389	0,10409389	0,526
10,55	80	-0,35192434	-0,86322176	0,86322176	0,70333333
11,64	85	-0,25360276	-1,24250647	1,24250647	0,776
13,38	90	-0,11428915	-2,11133491	2,11133491	0,892
11,25	95	-0,28768207	-1,09861229	1,09861229	0,75
12,85	100	-0,15470639	-1,78787597	1,78787597	0,85666667

10,69	105	-0,33874148	-0,90837082	0,90837082	0,71266667
13,83	110	-0,08121006	-2,4698364	2,4698364	0,922
13,22	120	-0,12631937	-2,00511747	2,00511747	0,88133333
12,17	130	-0,20907629	-1,4586972	1,4586972	0,81133333
14,69	140	-0,02088321	-3,85834997	3,85834997	0,97933333
13,57	150	-0,10018873	-2,25018703	2,25018703	0,90466667
14,62	160	-0,02565975	-3,64997448	3,64997448	0,97466667
14,33	170	-0,04569496	-3,06283281	3,06283281	0,95533333

Anexo 4

Tabla 4 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicada a disoluciones homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm

Masa de biosorbente = 1 g

Columna = 1

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
Cn	T	$\ln(C/Co)$	$\ln((Co/C)-1)$	$\ln(C/(Co-C))$	C/Co
0,24	1	-4,13516656	4,11903717	-4,11903717	0,016
0,16	5	-4,54063166	4,5299077	-4,5299077	0,01066667
0,39	10	-3,64965874	3,62331477	-3,62331477	0,026
0,27	15	-4,01738352	3,99921955	-3,99921955	0,018
0,44	20	-3,52903075	3,49925859	-3,49925859	0,02933333
0,52	25	-3,36197667	3,32669485	-3,32669485	0,03466667
0,31	30	-3,87923318	3,85834997	-3,85834997	0,02066667
0,51	35	-3,38139475	3,34680331	-3,34680331	0,034
0,24	40	-4,13516656	4,11903717	-4,11903717	0,016
0,8	45	-2,93119375	2,87638552	-2,87638552	0,05333333
1,2	50	-2,52572864	2,44234704	-2,44234704	0,08
1,18	55	-2,54253576	2,46060238	-2,46060238	0,07866667
1,35	60	-2,40794561	2,31363493	-2,31363493	0,09
1,7	65	-2,17742195	2,05713578	-2,05713578	0,11333333
2,11	70	-1,96136225	1,80976387	-1,80976387	0,14066667
3,17	75	-1,55431861	1,31690709	-1,31690709	0,21133333
3,59	80	-1,429898	1,15633796	-1,15633796	0,23933333
5,16	85	-1,06711362	0,64551913	-0,64551913	0,344
4,68	90	-1,16475209	0,79078565	-0,79078565	0,312
7,64	95	-0,6746526	-0,03733767	0,03733767	0,50933333
7,02	100	-0,75928698	0,12817519	-0,12817519	0,468
6,81	105	-0,78965808	0,18452178	-0,18452178	0,454

9,64	110	-0,44212909	-0,58695713	0,58695713	0,64266667
11,77	120	-0,24249628	-1,29307178	1,29307178	0,78466667
13,26	130	-0,12329822	-2,03086687	2,03086687	0,884
12,48	140	-0,18392284	-1,59986846	1,59986846	0,832
12,49	150	-0,18312188	-1,60464557	1,60464557	0,83266667
13,95	160	-0,07257069	-2,58668934	2,58668934	0,93
13,96	170	-0,0718541	-2,59697538	2,59697538	0,93066667
13,54	180	-0,10240193	-2,22721183	2,22721183	0,90266667
14,92	190	-0,00534761	-5,22843124	5,22843124	0,99466667
14,81	200	-0,01274757	-4,35603384	4,35603384	0,98733333
14,79	210	-0,01409892	-4,25459902	4,25459902	0,986

Anexo 5

Tabla 5 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicada a disoluciones homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 10 ppm

Masa de biosorbente = 1,5 g; ; Columna = 1

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
Cn	T	$\text{Ln}(C/\text{Co})$	$\text{Ln}((\text{Co}/C)-1)$	$\text{Ln}(C/(\text{Co}-C))$	C/Co
0,2293	1	-3,77530918	3,7521122	-3,7521122	0,02293
0,4339	3	-3,13752628	3,09316679	-3,09316679	0,04339
0,5118	5	-2,97240645	2,91987028	-2,91987028	0,05118
0,6828	10	-2,68413838	2,61341544	-2,61341544	0,06828
0,7229	15	-2,62706947	2,55203338	-2,55203338	0,07229
0,8168	20	-2,50494611	2,41973674	-2,41973674	0,08168
1,2491	25	-2,0801618	1,94673326	-1,94673326	0,12491
1,339	35	-2,01066203	1,86690712	-1,86690712	0,1339
1,5796	40	-1,84541344	1,67348568	-1,67348568	0,15796
1,9442	45	-1,63773451	1,42154175	-1,42154175	0,19442
2,3261	60	-1,45839205	1,19363192	-1,19363192	0,23261
2,7998	65	-1,27303711	0,94456082	-0,94456082	0,27998
3,2097	70	-1,13640762	0,74931765	-0,74931765	0,32097
3,6275	75	-1,01404139	0,56344815	-0,56344815	0,36275
4,3375	80	-0,83528695	0,26656735	-0,26656735	0,43375
4,6547	85	-0,76470763	0,13834021	-0,13834021	0,46547
5,0319	90	-0,68678745	-0,01276017	0,01276017	0,50319
5,8837	95	-0,53039928	-0,35723111	0,35723111	0,58837
6,2173	100	-0,47524936	-0,49689769	0,49689769	0,62173
7,3299	105	-0,31062322	-1,00984595	1,00984595	0,73299
7,853	110	-0,24168947	-1,29682411	1,29682411	0,7853
8,3813	115	-0,17658206	-1,64437968	1,64437968	0,83813

8,9849	120	-0,1070397	-2,18055826	2,18055826	0,89849
9,1249	125	-0,09157815	-2,34442405	2,34442405	0,91249
9,1846	130	-0,08505692	-2,42160466	2,42160466	0,91846
9,1379	135	-0,09015449	-2,36081461	2,36081461	0,91379
9,2936	140	-0,0732591	-2,57689962	2,57689962	0,92936
9,4117	145	-0,0606315	-2,77247185	2,77247185	0,94117
9,3426	150	-0,06800051	-2,6540472	2,6540472	0,93426
9,3641	155	-0,06570186	-2,68959719	2,68959719	0,93641
9,3964	160	-0,06225846	-2,74517019	2,74517019	0,93964
9,4502	165	-0,05654919	-2,84423661	2,84423661	0,94502
9,3629	170	-0,06583002	-2,68758372	2,68758372	0,93629
9,3926	175	-0,06266295	-2,73848987	2,73848987	0,93926
9,4439	180	-0,05721606	-2,83217618	2,83217618	0,94439

Anexo 6

Tabla 6 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 10 ppm

Masa de biosorbente = 1,5 g; ; Columna = (1+2)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
Cn	T	$\ln(C/\text{Co})$	$\ln((\text{Co}/C)-1)$	$\ln(C/(\text{Co}-C))$	C/Co
0,1231	3	-4,39734334	4,38495694	-4,38495694	0,01231
0,1504	5	-4,19704196	4,18188771	-4,18188771	0,01504
0,19	10	-3,9633163	3,94413348	-3,94413348	0,019
0,2473	15	-3,6997382	3,67469727	-3,67469727	0,02473
0,3464	20	-3,3627462	3,32749201	-3,32749201	0,03464
0,46	25	-3,07911388	3,03202227	-3,03202227	0,046
0,4844	35	-3,02742936	2,97777682	-2,97777682	0,04844
0,5282	40	-2,94086537	2,88659924	-2,88659924	0,05282
0,5721	45	-2,86102657	2,80211486	-2,80211486	0,05721
0,6552	60	-2,72539984	2,65763479	-2,65763479	0,06552
0,655	65	-2,72570514	2,65796148	-2,65796148	0,0655
0,7556	70	-2,58282824	2,50426111	-2,50426111	0,07556
0,8966	75	-2,41173054	2,31779342	-2,31779342	0,08966
0,8656	80	-2,44691746	2,35637988	-2,35637988	0,08656
0,901	85	-2,40683511	2,31241454	-2,31241454	0,0901
0,978	90	-2,3248307	2,22191165	-2,22191165	0,0978
1,1332	95	-2,1775396	2,05726848	-2,05726848	0,11332
1,2723	100	-2,06175881	1,92567559	-1,92567559	0,12723
1,392	105	-1,97184353	1,82195044	-1,82195044	0,1392
1,5637	110	-1,85553029	1,68548902	-1,68548902	0,15637
1,9846	115	-1,61716771	1,39594731	-1,39594731	0,19846
2,231	120	-1,50013518	1,24769154	-1,24769154	0,2231

2,5632	125	-1,36132862	1,06518417	-1,06518417	0,25632
2,9795	130	-1,21082959	0,85707894	-0,85707894	0,29795
3,2859	135	-1,11294451	0,71456921	-0,71456921	0,32859
3,3222	140	-1,10195788	0,69816138	-0,69816138	0,33222
3,6982	145	-0,99473888	0,53298909	-0,53298909	0,36982
3,9412	150	-0,93109985	0,43002652	-0,43002652	0,39412
4,1069	155	-0,88991661	0,36111369	-0,36111369	0,41069
4,6896	160	-0,7572378	0,12431987	-0,12431987	0,46896
4,7509	165	-0,74425102	0,09972256	-0,09972256	0,47509
4,8656	170	-0,72039506	0,05377295	-0,05377295	0,48656
5,0227	175	-0,68861746	-0,00908006	0,00908006	0,50227
5,1962	180	-0,6546575	-0,07852032	0,07852032	0,51962
5,244	185	-0,64550053	-0,09767759	0,09767759	0,5244
5,3736	190	-0,62108702	-0,14971905	0,14971905	0,53736
5,8318	195	-0,53925939	-0,33584141	0,33584141	0,58318
6,032	200	-0,50550646	-0,41881644	0,41881644	0,6032
6,2543	205	-0,46931587	-0,51266071	0,51266071	0,62543
6,6447	210	-0,40876555	-0,68327836	0,68327836	0,66447
7,0326	215	-0,35202861	-0,86287033	0,86287033	0,70326
7,2705	220	-0,31876003	-0,97970662	0,97970662	0,72705
7,684	225	-0,26344485	-1,19929869	1,19929869	0,7684
7,767	230	-0,2527011	-1,24653802	1,24653802	0,7767
8,3876	235	-0,17583067	-1,64903067	1,64903067	0,83876
8,7018	240	-0,13905519	-1,90255121	1,90255121	0,87018
9,2099	245	-0,0823061	-2,45587475	2,45587475	0,92099
9,2123	250	-0,08204555	-2,45917752	2,45917752	0,92123
9,5682	260	-0,04413999	-3,09823786	3,09823786	0,95682
9,62	270	-0,03874083	-3,23142829	3,23142829	0,962
9,8017	290	-0,02002925	-3,90053008	3,90053008	0,98017
9,8075	300	-0,01943769	-3,93080652	3,93080652	0,98075

9,837	310	-0,01643431	-4,10015586	4,10015586	0,9837
9,8774	320	-0,01233577	-4,38907757	4,38907757	0,98774
9,8566	330	-0,01444381	-4,23025863	4,23025863	0,98566

Anexo 7

Tabla 7 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Cr^{6+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm

Masa de biosorbente = 1,5 g ; Columna = (1+2)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
Cn	T	$\ln(C/\text{Co})$	$\ln((\text{Co}/C)-1)$	$\ln(C/(\text{Co}-C))$	C/Co
0,38	1	-3,67563423	3,64997448	-3,64997448	0,02533333
0,31	5	-3,87923318	3,85834997	-3,85834997	0,02066667
0,54	10	-3,32423634	3,28757236	-3,28757236	0,036
0,62	15	-3,186086	3,14387415	-3,14387415	0,04133333
0,65	20	-3,13883312	3,09453286	-3,09453286	0,04333333
0,88	25	-2,83588357	2,7754256	-2,7754256	0,05866667
0,92	30	-2,79143181	2,72813696	-2,72813696	0,06133333
1,11	35	-2,60369019	2,52680914	-2,52680914	0,074
1,38	40	-2,3859667	2,2894558	-2,2894558	0,092
1,75	45	-2,14843441	2,02438176	-2,02438176	0,11666667
2,1	50	-1,96611286	1,81528997	-1,81528997	0,14
3,5	55	-1,45528723	1,18958407	-1,18958407	0,23333333
3,14	60	-1,5638274	1,32894859	-1,32894859	0,20933333
4,18	65	-1,27773895	0,95108503	-0,95108503	0,27866667
4,32	70	-1,2447948	0,90511743	-0,90511743	0,288
4,63	75	-1,17549333	0,80636015	-0,80636015	0,30866667
5,51	80	-1,00148558	0,54367399	-0,54367399	0,36733333
7,8	85	-0,65392647	-0,08004271	0,08004271	0,52
6,55	90	-0,82858515	0,25470139	-0,25470139	0,43666667
8,35	95	-0,58578866	-0,22764468	0,22764468	0,55666667
8,43	100	-0,57625343	-0,24928294	0,24928294	0,562
10,11	105	-0,39452517	-0,72633273	0,72633273	0,674

10,97	110	-0,31288593	-1,0013979	1,0013979	0,73133333
11,14	120	-0,29750797	-1,05987505	1,05987505	0,74266667
13,39	130	-0,11354204	-2,11827398	2,11827398	0,89266667
14,77	140	-0,0154521	-4,16227407	4,16227407	0,98466667
13,18	150	-0,12934967	-1,97986403	1,97986403	0,87866667
14,62	160	-0,02565975	-3,64997448	3,64997448	0,97466667
14,75	170	-0,01680712	-4,07753744	4,07753744	0,98333333
14,93	180	-0,00467759	-5,36263265	5,36263265	0,99533333
14,99	190	-0,00066689	-7,3125535	7,3125535	0,99933333
14,83	200	-0,01139804	-4,468609	4,468609	0,98866667
14,87	210	-0,00870444	-4,73956659	4,73956659	0,99133333

Anexo 8

Tabla 8 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni²⁺, utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm : Masa de biosorbente = 1 g ; Columna = 1

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
C	T	Ln(C/Co)	Ln((Co/C)-1)	Ln(C/(Co-C))	C/Co
0,29	1	-3,94592456	3,92640189	-3,92640189	0,01933333
0,3501	5	-3,75758665	3,73396996	-3,73396996	0,02334
0,7876	10	-2,94681513	2,89287976	-2,89287976	0,05250667
0,625	15	-3,17805383	3,13549422	-3,13549422	0,04166667
0,8213	20	-2,90491703	2,84860767	-2,84860767	0,05475333
0,9711	25	-2,73737603	2,67044532	-2,67044532	0,06474
1,5858	30	-2,24696119	2,13522484	-2,13522484	0,10572
1,33383	35	-2,4199957	2,32686893	-2,32686893	0,088922
1,4619	40	-2,32831324	2,22577097	-2,22577097	0,09746
2,3213	45	-1,86592283	1,69779605	-1,69779605	0,15475333
2,6861	50	-1,71995987	1,52263838	-1,52263838	0,17907333
2,9485	55	-1,62675363	1,40789257	-1,40789257	0,19656667
2,8294	60	-1,66798553	1,45895853	-1,45895853	0,18862667
3,9312	65	-1,33910548	1,03518562	-1,03518562	0,26208
4,4921	70	-1,2057299	0,84980706	-0,84980706	0,29947333
4,8692	75	-1,12512055	0,73265064	-0,73265064	0,32461333
5,6371	80	-0,97868045	0,50738532	-0,50738532	0,37580667
4,9419	85	-1,11030033	0,71062841	-0,71062841	0,32946
6,3785	90	-0,85511724	0,30132612	-0,30132612	0,42523333
7,8334	95	-0,64965356	-0,0889653	0,0889653	0,52222667
7,9271	100	-0,63776293	-0,11401669	0,11401669	0,52847333
8,2524	105	-0,59754613	-0,20131718	0,20131718	0,55016
8,9285	110	-0,51880179	-0,38564272	0,38564272	0,59523333

9,4389	120	-0,46321075	-0,52904352	0,52904352	0,62926
10,5811	130	-0,34898081	-0,87317859	0,87317859	0,70540667
11,1367	140	-0,29780424	-1,05872422	1,05872422	0,74244667
12,902	150	-0,15066786	-1,81639783	1,81639783	0,86013333
13,335	160	-0,11765804	-2,08056703	2,08056703	0,889
14,8745	170	-0,00840186	-4,77509786	4,77509786	0,99163333
14,418	180	-0,03957278	-3,20976226	3,20976226	0,9612
14,6373	190	-0,02447714	-3,6977523	3,6977523	0,97582
14,7759	200	-0,01505273	-4,18866037	4,18866037	0,98506
14,8901	210	-0,00735364	-4,90888098	4,90888098	0,99267333
14,8518	220	-0,00992913	-4,60731364	4,60731364	0,99012
14,7527	230	-0,01662408	-4,08857922	4,08857922	0,98351333
14,9235	240	-0,00511305	-5,27340169	5,27340169	0,9949
14,8997	250	-0,00670912	-5,00093066	5,00093066	0,99331333
14,9588	260	-0,00275045	-5,89461678	5,89461678	0,99725333
14,72	270	-0,01884309	-3,96217279	3,96217279	0,98133333

Anexo 9

Tabla 9 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni²⁺, utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm : Masa de biosorbente = 1 g ; Columna = (1+2)

c		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
concentracion	t	Ln(C/Co)	Ln((Co/C)-1)	Ln(C/(Co-C))	C/Co
0,068	1	-5,39629777	5,39175413	-5,39175413	0,00453333
0,1964	5	-4,33565208	4,32247228	-4,32247228	0,01309333
0,1585	10	-4,55005089	4,539428	-4,539428	0,01056667
0,1892	15	-4,37300082	4,36030727	-4,36030727	0,01261333
0,131	20	-4,74060816	4,73183646	-4,73183646	0,00873333
0,0502	25	-5,69979045	5,69643817	-5,69643817	0,00334667
0,0624	30	-5,4822402	5,47807153	-5,47807153	0,00416
0,1751	35	-4,45044824	4,43870624	-4,43870624	0,01167333
0,0921	40	-5,09293054	5,08677161	-5,08677161	0,00614
0,0444	45	-5,82256601	5,81960162	-5,81960162	0,00296
0,0629	50	-5,47425932	5,47005717	-5,47005717	0,00419333
0,0853	55	-5,16963103	5,16392813	-5,16392813	0,00568667
0,0442	60	-5,82708069	5,82412967	-5,82412967	0,00294667
0,0966	65	-5,04522674	5,03876591	-5,03876591	0,00644
0,1075	70	-4,93831463	4,93112216	-4,93112216	0,00716667
0,0768	75	-5,27460084	5,26946769	-5,26946769	0,00512
0,0429	80	-5,85693365	5,85406956	-5,85406956	0,00286
0,1452	85	-4,63769338	4,62796622	-4,62796622	0,00968
0,0864	90	-5,1568178	5,15104115	-5,15104115	0,00576
0,1662	95	-4,5026136	4,49147176	-4,49147176	0,01108
0,2108	100	-4,26489566	4,25074265	-4,25074265	0,01405333
0,0826	105	-5,2017958	5,19627392	-5,19627392	0,00550667
0,0655	110	-5,43375534	5,42937911	-5,42937911	0,00436667

0,2345	120	-4,15834989	4,14259307	-4,14259307	0,01563333
0,1232	130	-4,80199643	4,79374918	-4,79374918	0,00821333
0,1502	140	-4,60383774	4,59377394	-4,59377394	0,01001333
0,2545	150	-4,07650464	4,05939239	-4,05939239	0,01696667
0,4878	160	-3,42589999	3,39283947	-3,39283947	0,03252
0,5728	170	-3,26526886	3,22633398	-3,22633398	0,03818667
0,6198	180	-3,18640863	3,14421069	-3,14421069	0,04132
0,9678	190	-2,74078003	2,67408451	-2,67408451	0,06452
1,2683	200	-2,47037278	2,38202961	-2,38202961	0,08455333
1,767	210	-2,13876701	2,01343052	-2,01343052	0,1178
2,262	220	-1,89180082	1,72834027	-1,72834027	0,1508
3,1675	230	-1,55510757	1,31790735	-1,31790735	0,21116667
4,0648	240	-1,30568566	0,9896224	-0,9896224	0,27098667
5,2805	250	-1,04402941	0,61011339	-0,61011339	0,35203333
6,3987	260	-0,85195536	0,29581851	-0,29581851	0,42658
7,8855	270	-0,64302457	-0,10289067	0,10289067	0,5257
8,4633	275	-0,57231103	-0,25830672	0,25830672	0,56422
9,2015	280	-0,48868369	-0,46176725	0,46176725	0,61343333
10,4942	290	-0,35722748	-0,84545727	0,84545727	0,69961333
11,5189	300	-0,26406104	-1,19664083	1,19664083	0,76792667
12,3285	310	-0,19613655	-1,52927354	1,52927354	0,8219
13,176	320	-0,12965321	-1,9773651	1,9773651	0,8784
13,9749	330	-0,07078734	-2,61247269	2,61247269	0,93166
14,3114	340	-0,04699378	-3,03415115	3,03415115	0,95409333
14,6214	350	-0,02556399	-3,65376125	3,65376125	0,97476
14,8114	360	-0,01265305	-4,36352406	4,36352406	0,98742667

Anexo 10

Tabla 10 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni^{2+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 25 ppm : Masa de biosorbente = 1 g ; Columna = (1)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
C	T	$\ln(C/Co)$	$\ln((Co/C)-1)$	$\ln(C/(Co-C))$	C/Co
0,2217	1	-4,21448036	4,71639843	-4,71639843	0,008868
0,6718	5	-3,61667043	3,58943077	-3,58943077	0,026872
1,1978	10	-3,03838928	2,98929147	-2,98929147	0,047912
1,5748	15	-2,76474754	2,69968409	-2,69968409	0,062992
1,9144	20	-2,56947157	2,48980479	-2,48980479	0,076576
2,5754	25	-2,27287096	2,16415371	-2,16415371	0,103016
2,4712	30	-2,31417196	2,21009063	-2,21009063	0,098848
3,1988	35	-2,05610009	1,91918927	-1,91918927	0,127952
4,6344	40	-1,68536908	1,48034046	-1,48034046	0,185376
6,9223	45	-1,28412774	0,95993105	-0,95993105	0,276892
7,7503	50	-1,17114427	0,8000632	-0,8000632	0,310012
9,6443	55	-0,95250876	0,46511967	-0,46511967	0,385772
11,914	60	-0,74116165	0,09382878	-0,09382878	0,47656
11,7569	65	-0,75443552	0,11903636	-0,11903636	0,470276
14,6675	70	-0,53324166	-0,35033989	0,35033989	0,5867
15,3997	75	-0,4845278	-0,47255368	0,47255368	0,615988
17,1071	80	-0,37938224	-0,77352996	0,77352996	0,684284
20,572	85	-0,1949449	-1,53598291	1,53598291	0,82288
20,6909	90	-0,18918183	-1,56896492	1,56896492	0,827636
21,1152	95	-0,16888266	-1,69292166	1,69292166	0,844608

Anexo 11

Tabla 11 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni²⁺, utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 25 ppm : Masa de biosorbente = 1 g ; Columna = (1+2)

no. de columna	T	Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
		Ln(C/Co)	Ln((Co/C)-1)	Ln(C/(Co-C))	C/Co
0,042	1	-6,38896149	6,38728007	-6,38728007	0,00168
0,0893	5	-5,63462962	5,63105122	-5,63105122	0,003572
0,1223	10	-5,32015406	5,31525006	-5,31525006	0,004892
0,1419	15	-5,17150852	5,16581635	-5,16581635	0,005676
0,077	20	-5,78282568	5,77974093	-5,77974093	0,00308
0,1568	25	-5,07166	5,06536824	-5,06536824	0,006272
0,2829	30	-4,48153763	4,47015711	-4,47015711	0,011316
0,1623	35	-5,03718463	5,03067146	-5,03067146	0,006492
0,1983	40	-4,83685007	4,82888644	-4,82888644	0,007932
0,222	45	-4,72395372	4,71503406	-4,71503406	0,00888
0,1778	50	-4,94597178	4,93883437	-4,93883437	0,007112
0,1744	55	-4,96527959	4,95827915	-4,95827915	0,006976
0,222	60	-4,72395372	4,71503406	-4,71503406	0,00888
0,268	65	-4,53564412	4,52486625	-4,52486625	0,01072
0,2342	70	-4,67045565	4,6610435	-4,6610435	0,009368
0,2723	75	-4,5197267	4,50877495	-4,50877495	0,010892
0,3479	80	-4,27471602	4,26070229	-4,26070229	0,013916
0,2865	85	-4,46889257	4,4573664	-4,4573664	0,01146
0,5428	90	-3,82989018	3,807939	-3,807939	0,021712
0,4822	95	-3,94827214	3,9287957	-3,9287957	0,019288
0,7016	100	-3,57326766	3,54480234	-3,54480234	0,028064
0,6598	105	-3,63469435	3,60794782	-3,60794782	0,026392
1,1848	110	-3,04930184	3,00075005	-3,00075005	0,047392

1,8057	120	-2,6279275	2,55295823	-2,55295823	0,072228
2,5934	130	-2,26590607	2,1563858	-2,1563858	0,103736
3,008	140	-2,11760042	1,98940334	-1,98940334	0,12032
6,2587	150	-1,38490333	1,09675715	-1,09675715	0,250348
13,2889	160	-0,63194672	-0,12639199	0,12639199	0,531556
14,2173	170	-0,56441629	-0,27651653	0,27651653	0,568692
17,7687	180	-0,34143734	-0,89901966	0,89901966	0,710748
20,0247	190	-0,22190931	-1,39248084	1,39248084	0,800988
21,3319	200	-0,15867222	-1,76052979	1,76052979	0,853276
23,1291	210	-0,07778426	-2,51467197	2,51467197	0,925164
23,629	220	-0,05640105	-2,84693437	2,84693437	0,94516
23,9351	230	-0,04352982	-3,1124651	3,1124651	0,957404
24,8852	240	-0,00460258	-5,37883704	5,37883704	0,995408
24,9655	250	-0,00138095	-6,58429083	6,58429083	0,99862

Anexo 12

Tabla 12 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni^{2+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 25 ppm: Masa de biosorbente = 1,5 g: Columna = (1+2)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
C	T	$\ln(C/Co)$	$\ln((Co/C)-1)$	$\ln(C/(Co-C))$	C/Co
0,1421	1	-5,17010007	5,16439985	-5,16439985	0,005684
0,1628	5	-5,03410865	5,02757535	-5,02757535	0,006512
0,0361	10	-6,54033824	6,53889319	-6,53889319	0,001444
0,0985	15	-5,53657456	5,53262677	-5,53262677	0,00394
0,1217	20	-5,3250721	5,32019222	-5,32019222	0,004868
0,2527	25	-4,59442809	4,58426866	-4,58426866	0,010108
0,2649	30	-4,54727871	4,53662617	-4,53662617	0,010596
0,1171	35	-5,36360283	5,35890783	-5,35890783	0,004684
0,3177	40	-4,36552356	4,35273413	-4,35273413	0,012708
0,4968	45	-3,91844357	3,89837147	-3,89837147	0,019872
0,4538	50	-4,00897453	3,99065576	-3,99065576	0,018152
0,8168	55	-3,42123684	3,38801919	-3,38801919	0,032672
0,8586	60	-3,37132795	3,33638033	-3,33638033	0,034344
1,5949	65	-2,75206479	2,68614291	-2,68614291	0,063796
1,7963	70	-2,63314683	2,55858275	-2,55858275	0,071852
2,9973	75	-2,12116394	1,99345329	-1,99345329	0,119892
3,1962	80	-2,05691322	1,92012166	-1,92012166	0,127848
5,0791	85	-1,59374174	1,36663535	-1,36663535	0,203164
4,3238	90	-1,75474118	1,56484864	-1,56484864	0,172952
5,9527	95	-1,43503093	1,16308046	-1,16308046	0,238108
9,7834	100	-0,93818875	0,44169987	-0,44169987	0,391336
13,7589	105	-0,59718994	-0,20210918	0,20210918	0,550356

15,8324	110	-0,45681735	-0,54638294	0,54638294	0,633296
14,8261	120	-0,52248668	-0,37656352	0,37656352	0,593044
17,1718	130	-0,37560732	-0,7855359	0,7855359	0,686872
20,3588	140	-0,20536257	-1,4785403	1,4785403	0,814352
21,5326	150	-0,14930776	-1,82616303	1,82616303	0,861304
23,2341	160	-0,0732548	-2,57696055	2,57696055	0,929364
23,6744	170	-0,05448153	-2,88252911	2,88252911	0,946976
24,8979	180	-0,00409236	-5,49658602	5,49658602	0,995916

Anexo 13

Tabla 13 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni²⁺, utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 25 ppm : Masa de biosorbente = 1,5 g: ; Columna = (1+2)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
C	T	Ln(C/Co)	Ln((Co/C)-1)	Ln(C/(Co-C))	C/Co
0,0581	1	-6,06446544	6,06213874	-6,06213874	0,002324
0,0384	5	-6,47857364	6,47703646	-6,47703646	0,001536
0,0669	10	-5,92343214	5,92075255	-5,92075255	0,002676
0,2667	15	-4,54050667	4,52978136	-4,52978136	0,010668
0,1246	20	-5,3015225	5,29652604	-5,29652604	0,004984
0,0137	25	-7,50923527	7,50868712	-7,50868712	0,000548
0,2486	30	-4,61078592	4,60079215	-4,60079215	0,009944
0,1128	35	-5,40101476	5,39649255	-5,39649255	0,004512
0,0795	40	-5,75087408	5,74768902	-5,74768902	0,00318
0,1318	45	-5,24534548	5,24005954	-5,24005954	0,005272
0,0682	50	-5,90418654	5,90145481	-5,90145481	0,002728
0,0115	55	-7,68428407	7,68382396	-7,68382396	0,00046
0,0069	60	-8,19510969	8,19483365	-8,19483365	0,000276
0,1288	65	-5,26837029	5,26320497	-5,26320497	0,005152
0,0913	70	-5,61248032	5,60882163	-5,60882163	0,003652
0,0654	75	-5,94610885	5,94348942	-5,94348942	0,002616
0,0166	80	-7,31722841	7,31656419	-7,31656419	0,000664
0,1354	85	-5,21839774	5,21296702	-5,21296702	0,005416
0,1907	90	-4,87592959	4,86827235	-4,86827235	0,007628
0,0026	95	-9,17111966	9,17101565	-9,17101565	0,000104
0,0109	100	-7,73786831	7,73743222	-7,73743222	0,000436
0,01	105	-7,82404601	7,82364593	-7,82364593	0,0004
0,0169	110	-7,29931748	7,29864125	-7,29864125	0,000676

0,134	120	-5,2287913	5,22341689	-5,22341689	0,00536
0,0458	130	-6,30234701	6,30051333	-6,30051333	0,001832
0,1981	140	-4,83785915	4,82990359	-4,82990359	0,007924
0,2242	150	-4,71409259	4,70508414	-4,70508414	0,008968
0,3557	160	-4,25254342	4,23821324	-4,23821324	0,014228
0,2083	170	-4,78765176	4,77928485	-4,77928485	0,008332
0,3856	180	-4,17183054	4,15628635	-4,15628635	0,015424
0,3996	190	-4,13616706	4,12005394	-4,12005394	0,015984
0,9594	200	-3,26032301	3,22119126	-3,22119126	0,038376
3,4898	210	-1,9690314	1,81868281	-1,81868281	0,139592
2,8117	220	-2,18508654	2,06577584	-2,06577584	0,112468
6,0104	230	-1,42538452	1,15040016	-1,15040016	0,240416
10,1872	240	-0,89774379	0,37435964	-0,37435964	0,407488
13,2281	250	-0,63653247	-0,11662802	0,11662802	0,529124
14,345	260	-0,55547438	-0,29737218	0,29737218	0,5738
17,5818	270	-0,35201155	-0,86292784	0,86292784	0,703272
23,0471	275	-0,08133588	-2,4682245	2,4682245	0,921884
22,0814	280	-0,1241402	-2,02363158	2,02363158	0,883256
23,4798	290	-0,06273535	-2,73729857	2,73729857	0,939192
24,4579	300	-0,02192255	-3,80925806	3,80925806	0,978316
24,5724	310	-0,01725196	-4,05119096	4,05119096	0,982896
24,9493	320	-0,00203006	-6,19867513	6,19867513	0,997972
24,9882	330	-0,00047211	-7,65805946	7,65805946	0,999528

Anexo 14

Tabla 14 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni²⁺, utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm : Masa de biosorbente = 1,5 g ; Columna = (1)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
C	T	Ln(C/Co)	Ln((Co/C)-1)	Ln(C/(Co-C))	C/Co
0,175	1	-4,45101951	4,43928425	-4,43928425	0,01166667
0,0162	5	-6,83079424	6,82971365	-6,82971365	0,00108
0,1769	10	-4,44022088	4,42835745	-4,42835745	0,01179333
0,1995	15	-4,31999124	4,30660201	-4,30660201	0,0133
0,0277	20	-6,29437307	6,29252469	-6,29252469	0,00184667
0,163	25	-4,52205528	4,51112914	-4,51112914	0,01086667
0,0727	30	-5,3294641	5,32460565	-5,32460565	0,00484667
0,2162	35	-4,23960157	4,22508336	-4,22508336	0,01441333
0,1323	40	-4,73073341	4,72187428	-4,72187428	0,00882
0,244	45	-4,11863725	4,10223683	-4,10223683	0,01626667
0,2364	50	-4,15028019	4,13439469	-4,13439469	0,01576
0,1507	55	-4,60051437	4,5904169	-4,5904169	0,01004667
0,1379	60	-4,6892767	4,68004084	-4,68004084	0,00919333
0,2438	65	-4,11945726	4,1030704	-4,1030704	0,01625333
0,3155	70	-3,8616468	3,84038911	-3,84038911	0,02103333
0,2541	75	-4,07807759	4,06099247	-4,06099247	0,01694
0,4146	80	-3,58849128	3,56046211	-3,56046211	0,02764
0,3424	85	-3,77982584	3,75673461	-3,75673461	0,02282667
0,5567	90	-3,29377898	3,25595942	-3,25595942	0,03711333
0,5314	95	-3,34029045	3,30422103	-3,30422103	0,03542667
0,6965	100	-3,06973769	3,02219175	-3,02219175	0,04643333
0,9539	105	-2,75524664	2,68954121	-2,68954121	0,06359333

0,7758	110	-2,96191073	2,90880526	-2,90880526	0,05172
1,2697	120	-2,46926955	2,38082442	-2,38082442	0,08464667
2,6832	130	-1,72104009	1,52395407	-1,52395407	0,17888
2,4606	140	-1,80764498	1,62847046	-1,62847046	0,16404
3,0569	150	-1,59064887	1,36275238	-1,36275238	0,20379333
4,4237	160	-1,22107375	0,8716392	-0,8716392	0,29491333
6,7531	170	-0,79804854	0,19983571	-0,19983571	0,45020667
7,8021	180	-0,65365727	-0,08060361	0,08060361	0,52014
9,706	190	-0,43530595	-0,60617015	0,60617015	0,64706667
10,1969	200	-0,38596645	-0,75282221	0,75282221	0,67979333
11,4362	210	-0,27126644	-1,16595637	1,16595637	0,76241333
12,8152	220	-0,15741823	-1,76910768	1,76910768	0,85434667
13,6167	230	-0,09675322	-2,28682503	2,28682503	0,90778
14,8254	240	-0,01170828	-4,44159956	4,44159956	0,98836
14,1551	250	-0,05797522	-2,81861199	2,81861199	0,94367333
14,4475	260	-0,03752881	-3,26382323	3,26382323	0,96316667
14,734	270	-0,01789245	-4,01441672	4,01441672	0,98226667
14,8242	280	-0,01178922	-4,43466927	4,43466927	0,98828
14,8179	290	-0,01221429	-4,3990352	4,3990352	0,98786
14,869	300	-0,00877169	-4,73183646	4,73183646	0,99126667
14,8999	310	-0,0066957	-5,00294009	5,00294009	0,99332667

Anexo 15

Tabla 15 Cuantificación de los estudios de remoción en continuo aplicado a disoluciones homoiónicas modelos de Ni^{2+} , utilizando bagazo natural como biosorbente.

Concentración inicial= 15 ppm : Masa de biosorbente = 1,5 g ; Columna = (1+2)

		Adams y B	Thomas	Yoon	Dose and Answer
C	T	$\ln(C/Co)$	$\ln((Co/C)-1)$	$\ln(C/(Co-C))$	C/Co
0,0526	1	-5,65308936	5,64957653	-5,64957653	0,00350667
0,0845	5	-5,17905395	5,17340469	-5,17340469	0,00563333
0,1271	10	-4,7708313	4,76232187	-4,76232187	0,00847333
0,0733	15	-5,32124487	5,31634623	-5,31634623	0,00488667
0,062	20	-5,4886711	5,4845292	-5,4845292	0,00413333
0,0904	25	-5,11156121	5,10551631	-5,10551631	0,00602667
0,1093	30	-4,92170908	4,91439574	-4,91439574	0,00728667
0,1471	35	-4,62469285	4,61483778	-4,61483778	0,00980667
0,1297	40	-4,75058139	4,74189712	-4,74189712	0,00864667
0,1733	45	-4,46078128	4,44916069	-4,44916069	0,01155333
0,1615	50	-4,53130034	4,52047529	-4,52047529	0,01076667
0,1394	55	-4,67845798	4,6691212	-4,6691212	0,00929333
0,155	60	-4,57238036	4,56199327	-4,56199327	0,01033333
0,197	65	-4,33260175	4,31938141	-4,31938141	0,01313333
0,1977	70	-4,32905475	4,31578712	-4,31578712	0,01318
0,1881	75	-4,37883174	4,36621245	-4,36621245	0,01254
0,1818	80	-4,4128983	4,40070425	-4,40070425	0,01212
0,2402	85	-4,13433357	4,11819064	-4,11819064	0,01601333
0,1978	90	-4,32854906	4,31527468	-4,31527468	0,01318667
0,1949	95	-4,34331887	4,33024039	-4,33024039	0,01299333
0,2631	100	-4,04327129	4,02557564	-4,02557564	0,01754
0,2351	105	-4,15579452	4,13999707	-4,13999707	0,01567333
0,2158	110	-4,24145343	4,22696227	-4,22696227	0,01438667

0,1145	120	-4,87523066	4,86756804	-4,86756804	0,00763333
0,1897	130	-4,3703616	4,35763429	-4,35763429	0,01264667
0,1834	140	-4,40413592	4,39183389	-4,39183389	0,01222667
0,18	150	-4,42284863	4,41077605	-4,41077605	0,012
0,2446	160	-4,11618126	4,09974017	-4,09974017	0,01630667
0,2989	170	-3,91569641	3,89556853	-3,89556853	0,01992667
0,2606	180	-4,05281882	4,03529279	-4,03529279	0,01737333
0,2666	190	-4,03005607	4,0121229	-4,0121229	0,01777333
0,2144	200	-4,24796205	4,23356558	-4,23356558	0,01429333
0,2565	210	-4,06867682	4,05142892	-4,05142892	0,0171
0,2166	220	-4,23775315	4,22320787	-4,22320787	0,01444
0,227	230	-4,19085546	4,17560645	-4,17560645	0,01513333
0,2578	240	-4,06362139	4,04628532	-4,04628532	0,01718667
0,2885	250	-3,95111039	3,93168969	-3,93168969	0,01923333
0,3446	260	-3,77342116	3,75017982	-3,75017982	0,02297333
0,5539	270	-3,29882132	3,2611956	-3,2611956	0,03692667
0,6402	280	-3,15402485	3,11040729	-3,11040729	0,04268
0,662	290	-3,12053992	3,07540308	-3,07540308	0,04413333
1,9255	300	-2,05286453	1,91547809	-1,91547809	0,12836667
1,8048	310	-2,11760042	1,98940334	-1,98940334	0,12032
1,988	320	-2,02092109	1,8787429	-1,8787429	0,13253333
3,716	330	-1,39540238	1,11073797	-1,11073797	0,24773333
4,0475	340	-1,30995079	0,99546833	-0,99546833	0,26983333
7,5263	350	-0,68964665	-0,00701336	0,00701336	0,50175333
7,9909	360	-0,62974681	-0,13109409	0,13109409	0,53272667
9,4444	370	-0,46262823	-0,53061555	0,53061555	0,62962667
11,8077	380	-0,23929834	-1,3080102	1,3080102	0,78718
11,8726	390	-0,23381698	-1,33403124	1,33403124	0,79150667
11,9119	400	-0,2305123	-1,34998189	1,34998189	0,79412667
13,4601	410	-0,10832045	-2,16801227	2,16801227	0,89734

14,3388	420	-0,04508105	-3,07666806	3,07666806	0,95592
14,2284	430	-0,05281023	-2,91452897	2,91452897	0,94856
14,7374	440	-0,01766172	-4,0275118	4,0275118	0,98249333
14,6716	450	-0,02213655	-3,79943655	3,79943655	0,97810667
14,8744	460	-0,00840859	-4,77429464	4,77429464	0,99162667

Anexo 16

Tabla 16 Calculo de costos variables y costos fijos

C. Equip. (\$)	1346,38
C. Mont e inst. (\$)	471,23
inversion total	3166,66
Inv de trabajo (\$)	316,6
Gastos MP y MO (\$/a)	4459
Requerimientos (\$/a)	941,76
Mantenimiento (\$/a)	142,5
Días al año	300
Horas al día	8
Vida útil (años)	10
Tasa de interés (%)	12
tratamiento máx. (t/a)	314
Precio tratamiento (\$/m3)	1,046
Valor final (\$)	0
calculo de v	$v=CV/tt.max$
	$v=(Gmp+Mo+Req+Mtto)/tt max$
	3,98

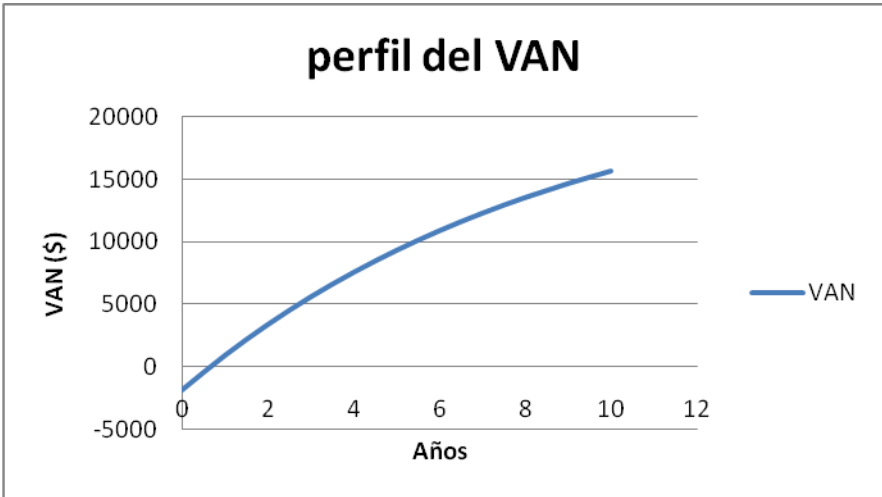


Figura 1 Plazo de recuperación de la inversión al descontado. PRD [años]