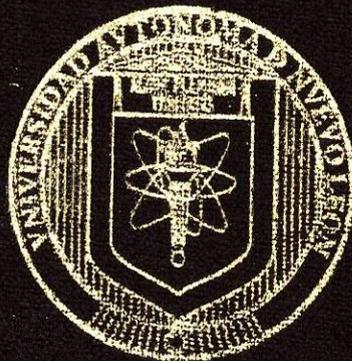


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS

"REMOCION DE METALES PESADOS DE
DISOLUCIONES ACUOSAS SINTETICAS
UTILIZANDO BIOMASA DE
Rhodotorula mucilaginosa

PRESENTADA POR:

LUIS RAUL REYES CHAVEZ

CD. UNIVERSITARIA A JUNIO 2005

TL

TD758

.5

.H43

R49

2005

c.1



1080170745

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS



TESIS

"REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE
DISOLUCIONES ACUOSAS SINTÉTICAS
UTILIZANDO BIOMASA DE

Rhodotorula mucilaginosa

PRESENTADA POR:

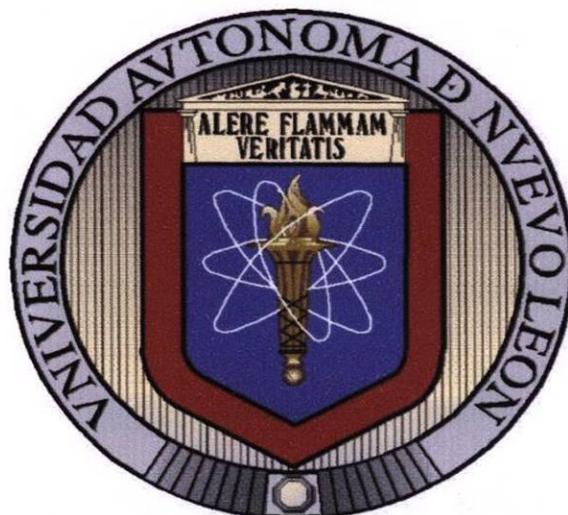
LUIS RAUL REYES CHAVEZ

CD. UNIVERSITARIA A JUNIO 2005



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS

**“REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE DISOLUCIONES ACUOSAS
SINTÉTICAS UTILIZANDO BIOMASA DE *Rhodotorula mucilaginosa*.”**

PRESENTADA POR:

LUIS RAÚL REYES CHÁVEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Q.F.B. EMILIA EDITH VÁZQUEZ FARÍAS
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

La tesis elaborada por el Sr. *Luis Raúl Reyes Chávez* titulada:

**REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE DISOLUCIONES ACUOSAS
SINTÉTICAS UTILIZANDO BIOMASA DE *Rhodotorula mucilaginosa*.**

Ha sido aceptada como requisito parcial para optar al título de Licenciado en Química Industrial.

M.C. Ma. Teresa Garza González
DIRECTOR DE TESIS
PRESIDENTE

M.C. Isabel del Carmen Sáenz
REVISOR
SECRETARIO

Dra. Cecilia Rodríguez de Barbarin
REVISOR
VOCAL

M.C. Adriana Liñan Montes
REVISOR
SUPLENTE

AGRADECIMIENTOS:

A mi madre por darme todo el apoyo, comprensión y cariño durante todo este tiempo.

A mi asesora la M.C. Ma. Teresa Garza González por su asesoría, paciencia y dedicación que mostró conmigo a lo largo de este proyecto, por darme la oportunidad de *obtener experiencia profesional y por los conocimientos brindados en este proyecto.*

Al Programa de Apoyo a la Investigación Científica PAICYT 2002 CN-728-02.

A la Dra. Martha A. Suárez Herrera por brindarme su apoyo al darme la oportunidad de trabajar en las instalaciones del Laboratorio de Biotecnología.

A la Dra. Cecilia Rodríguez de Barbarín y a la M.C. Isabel del Carmen Sáenz de López por el soporte en la revisión de este proyecto y además por sus grandes consejos para la realización de este.

A la Dra. Blanca Nájera y al L.Q.I. Enrique Valdez por dejarme trabajar en las instalaciones del Laboratorio de Síntesis Orgánica, además de la utilización del Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

A mis grandes amigos y compañeros del Laboratorio David, Lupita, Verónica, Boer, Sagrario, Jennifer gracias por todos sus consejos, apoyo y comprensión en todos los momentos que vivimos juntos.

A mis amigos Yovanna, Alejandro, Antonio, Angeles, Blanquita, Horacio, Emmanuel, Rolando, Guillermo, Raquel, Dora, Edgar, Roberto, Juan Carlos. Gracias por brindarme su amistad al apoyarme en las buenas y en las malas y por alentarme a conseguir mis metas.

RESUMEN

La gran industrialización y las actividades humanas en el mundo, han impactado en el ambiente a través de la disposición de desechos conteniendo metales pesados, los cuales debido a su movilidad en el ambiente y a su toxicidad, se les ha dado prioridad como los contaminantes inorgánicos mas importantes para el desarrollo de nuevos métodos, para la remoción y recuperación de metales de disoluciones y para la reducción de iones metálicos a muy bajas concentraciones.

El uso de tecnologías convencionales para la recuperación de metales como: intercambio iónico, precipitación química, ósmosis inversa, son usualmente ineficientes y de alto costo. La biotecnología es una de las opciones más atrayentes para la remoción de metales, con grandes perspectivas, a la cual se le a puesto atención debido a su gran potencialidad y bajo costo. Las técnicas utilizadas son: la biosorción, fitorremediación, precipitación extracelular.

En el presente trabajo, el proceso de biosorción para la remoción de metales pesados (Cr^{6+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+}) de disoluciones acuosas sintéticas por *Rhodotorula mucilaginosa* fue evaluado. Factores como el tiempo de contacto, cantidad de biomasa, concentración inicial del metal, pH y presencia de otros metales fueron estudiados. Se encontró que la sorción de metales por *Rhodotorula mucilaginosa* fue influenciada por el pH de la disolución, la concentración inicial del metal y la cantidad de biomasa. La cinética de sorción mostró que la unión del metal fue un proceso rápido, requiriendo para ello 15 minutos de contacto biomasa-metal.

Se encontró que la afinidad de los metales por la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* fue:



y las capacidades de sorción máximas (q_{max}) fueron 63.73, 37.00, 35.63, 24.73 y 20.15 mg/g respectivamente

Para la determinación de la concentración de metal en disolución, se utilizó la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS).

Se determinó que la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* es un buen biosorbente para la remoción de los metales Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II).

INDICE

Introducción	1
Capítulo I Antecedentes	4
I.1 Los metales aplicaciones y efectos	4
I.1.1 Cobre	4
I.1.2 Cromo	5
I.1.3 Níquel	7
I.1.4 Plomo	7
I.1.5 Zinc	9
I.2 Alternativas para la remoción de metales	10
I.2.1 Fitorremediación	10
I.2.2 Remediación microbiana	10
I.3 Características de <i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	13
I.3.1 Clasificación Taxonómica	13
I.3.2 Características Morfoculturales	13
I.3.3 Características de la pared celular	13
I.4 Mecanismo de la Biosorción	14
I.5 Factores que afectan la biosorción	16
I.5.1 Potencial de Hidrógeno	16
I.5.2 Concentración de Biomasa	16
I.5.3 Temperatura	17
I.5.4 Presencia de otros metales	17
I.6 Modelos matemáticos para el análisis de adsorción	18
I.7 Métodos Analíticos	19
I.7.1 Espectroscopia de Absorción Atómica	19
Justificación	21
Hipótesis	21
Objetivo General	22
Objetivos Específicos	22

Capítulo II Materiales y Métodos	23
II.1 Ubicación	23
II.2 Mantenimiento de la viabilidad y capacidad de sorción microorganismo	23
II.3 Obtención de la biomasa	23
II.3.1 Preparación del inóculo	23
II.3.2 Propagación de la levadura	24
II.3.3 Producción del biosorbente	24
II.4 Preparación de las disoluciones de los metales	24
II.5 Valoración del efecto de factores	25
II.5.1 Tiempo de contacto biomasa-metal	25
II.5.2 pH y concentración inicial del meta	25
II.5.3 Concentración de biomasa en la sorción	25
II.6 Valoración de la sorción de <i>R. mucilaginosa</i> en disoluciones multimetálicas	26
II.7 Técnicas Analíticas	26
Capítulo III Resultados y Discusión	28
III.1 Mantenimiento de la viabilidad y la capacidad de sorción del microorganismo.	28
III.2 Preparación del biosorbente	28
III.3 Tiempo de contacto	29
III.4 pH y Concentración inicial de metal	30
III.5 Concentración de biomasa	35
III.6 Evaluación de la sorción en mezclas multimetálicas	36
Capítulo IV Conclusiones	41
Capítulo V Recomendaciones	42
Capítulo VI Bibliografía	43

APÉNDICE DE TABLAS

50

Tabla I.	Resultados de la sorción de Cu(II) a pH 2	51
Tabla II.	Resultados de la sorción de Cu(II) a pH 5	52
Tabla III.	Resultados de la sorción de Cu(II) a pH 7	53
Tabla IV.	Resultados de la sorción de Cr(VI) a pH 2	54
Tabla V.	Resultados de la sorción de Cr(VI) a pH 5	55
Tabla VI.	Resultados de la sorción de Cr(VI) a pH 7	56
Tabla VII.	Resultados de la sorción de Ni(II) a pH 2	57
Tabla VIII.	Resultados de la sorción de Ni(II) a pH 5	58
Tabla IX.	Resultados de la sorción de Ni(II) a pH 7	59
Tabla X.	Resultados de la sorción de Pb(II) a pH 2	60
Tabla XI.	Resultados de la sorción de Pb(II) a pH 5	61
Tabla XII.	Resultados de la sorción de Pb(II) a pH 7	62
Tabla XIII.	Resultados de la sorción de Zn(II) a pH 2	63
Tabla XIV.	Resultados de la sorción de Zn(II) a pH 5	64
Tabla XV.	Resultados de la sorción de Zn(II) a pH 7	65
Tabla XVI.	Influencia de la concentración de biomasa en la sorción de Cu(II)	66
Tabla XVII.	Influencia de la concentración de biomasa en la sorción de Cr(VI)	67
Tabla XVIII.	Influencia de la concentración de biomasa en la sorción de Ni(II)	68
Tabla XIX.	Influencia de la concentración de biomasa en la sorción de Pb(II)	69
Tabla XX.	Influencia de la concentración de biomasa en la sorción de Zn(II)	70

APÉNDICE DE FIGURAS	71
Figura 1 Observación Microscópica de <i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	72
Figura 2 Observación Macroscópica de <i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	72
Figura 3 Curva de calibración de Cu(II)	73
Figura 4 Curva de calibración de Cr(VI)	74
Figura 5 Curva de calibración de Ni(II)	75
Figura 6 Curva de calibración de Pb(II)	76
Figura 7 Curva de calibración de Zn(II)	77
Figura 8 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla binaria de Cr(VI) y Pb(II) a pH 2	78
Figura 9 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla binaria de Cr(VI) y Pb(II) a pH 5	78
Figura 10 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla binaria de Ni(II) y Pb(II) a pH 5	79
Figura 11 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla binaria de Cu(II) y Zn(II) a pH 5	79
Figura 12 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla de Cr(VI), Ni(II) y Zn(II) a pH 2	80
Figura 13 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla de Cr(VI), Ni(II) y Zn(II) a pH 5	80
Figura 14 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla de Cu(II), Pb(II) y Zn(II) a pH 5	81
Figura 15 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla de Cu(II), Ni(II) y Pb(II) a pH 5	81
Figura 16 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla de los seis metales a pH 5.	82
Figura 17 Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de <i>R. mucilaginosa</i> en una mezcla de los seis metales a pH 2.	82

ABREVIATURAS

Ag	Plata
ton.	Toneladas
°C	Grados Celsius
cols.	Colaboradores
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
AAS	Espectroscopía de Absorción Atómica
L	Litros
g	Gramos
mg	Miligramos
mL	Mililitros
h	Horas
min.	Minutos
Ni	Níquel
Pb	Plomo
pH	Logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno
rpm	Revoluciones <i>por minuto</i>
q	Capacidad de sorción
q _{max}	Capacidad de sorción maxima
Zn	Cinc
Va	Vanadio
U	Uranio

INTRODUCCIÓN

Uno de los actuales problemas ambientales que ha cobrado gran importancia es la descarga de desechos industriales con altas concentraciones de metales que causan contaminación al ambiente, principalmente al agua. La mayoría de estos metales forman compuestos tóxicos para el hombre y no pueden ser degradados como los compuestos orgánicos, solo pueden cambiar su estado de oxidación, precipitar, disolverse, pero permanecen en el sitio contaminado.⁶

Dicha contaminación con metales tóxicos surge como resultado de actividades humanas, principalmente industriales, sin embargo, fuentes como la agricultura y la eliminación de residuos también contribuyen (Tabla 1).⁶

Tabla 1. Fuentes antropogénicas de metales tóxicos y elementos relacionados.

Metal tóxico	Potencia y Energía				Metales		Agricultura	Manufactura	Eliminación de residuos	
	Carbón	Aceite	Madera	Energía	No ferroso	Fierro y aluminio			Sólidos	Aguas residuales
Cd	8,529	143	120	125	7,371	156	3,666	2,450	1,147	24,319
Hg	4,670		180	1,800	229		5,245	1,145	2,420	498
Mn	1,087,212	1,395	N.R	11,400	17,905	25,000	230,600	20,515	25,256	134,055
Pb	8,158	250,449	2,100	720	54,725	9,732	192	9,300	42,100	16,470
Zn	11,100	2,159	N.R	18,000	97,287	34,325	824,935	85,015	65,100	103,715

° Las unidades respectivas del metal son ton/año.

Estos metales, son descargados en la atmósfera y en los ambientes acuáticos, principalmente como soluto o partículas y pueden alcanzar concentraciones elevadas, especialmente cerca del sitio de descarga.⁶

De los 106 elementos conocidos por el hombre, 84 son metales, por lo que no es de extrañar que las posibilidades de contaminación metálica en el ambiente sean numerosas. Hay que tener presente que los metales han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo de las civilizaciones.

Los problemas ambientales surgen cuando prolifera el uso de éstos en la industria y su empleo creciente en la vida cotidiana termina por afectar a la salud.⁶⁰

Además, el crecimiento demográfico en zonas urbanas y la rápida industrialización han provocado serios daños ecológicos y deterioro del ambiente, sobre todo, en los países desarrollados y en vías de desarrollo.⁶⁰

El término metales pesados, agrupa a una serie de elementos como Cu(II), Zn(II), Pb(II), Hg(II) entre otros, presentes en el medio ambiente en débiles concentraciones.

La mayoría de éstos, salvo el Hg(II) y el Pb(II), no son peligrosos en su forma elemental, en cambio las sales y demás combinaciones químicas (abundantes en el medio ambiente) son muy tóxicas.⁵

Pero no todos los metales son peligrosos; algunos, pese a su toxicidad, se presentan de forma muy escasa o insoluble, por lo que el número de estos productos dañinos para la salud solo engloba a unos pocos. Entre ellos, destacan el plomo, cromo y el mercurio, seguidos por berilio, bario, cadmio, cobre, manganeso, níquel, estaño, vanadio y zinc.⁶¹

Los metales pueden ser clasificados en **esenciales**: necesarios en cantidades mínimas en el organismo, y **no esenciales**: no presentan ninguna función biológica.⁵

Algunos de ellos (Mo, Fe, Ni, Cu, Co, Zn) en dosis muy pequeñas, son indispensables para los organismos vivos, plantas, animales y microorganismos pero se vuelven tóxicos en dosis elevadas, provocando su acumulación a lo largo de las cadenas alimentarias y como consecuencia causan graves daños a la salud del hombre.^{5,13}

Ciertos metales son cancerígenos (Ni, Co, Cd, Pb), otros teratógenos, es decir, causantes de malformaciones (Cr, Co, Pb, Hg). La ingesta por parte del hombre de productos vegetales o animales contaminados, puede provocar síntomas de intoxicación, inhibiendo varios sistemas enzimáticos, lo que provoca daños muy importantes en el funcionamiento general del organismo.^{4,52}

El aumento rápido de la concentración de algunos de estos elementos en el medio ambiente, consecuencia directa del desarrollo industrial, plantea graves problemas para la perennidad de los ecosistemas y la salud del hombre, ya que pueden causar afecciones respiratorias, náuseas, ritmo cardíaco anormal, daños en vísceras, e incluso la muerte ante altas concentraciones.^{25,41}

Es importante recordar que los metales pesados pueden transformarse o retirarse del medio, pero no degradarse.

De ahí la necesidad de encontrar soluciones a este problema aunque hay que destacar que requieren altos costos y un gran avance tecnológico.^{17,41}

Ante la problemática descrita es necesaria la búsqueda de tecnologías alternas para eliminar contaminantes de las aguas residuales industriales, por lo que en este trabajo se propone el uso de microorganismos para este fin.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

I.1.- Los metales: Aplicaciones y efectos.

El crecimiento industrial ha provocado el desarrollo de problemas ambientales en México, entre los de más impacto está la contaminación por metales pesados. Ciudades como Torreón, Monterrey, Gómez Palacio, Ciudad Lerdo, León y Mérida han sido blanco de contaminación de suelo y aguas subterráneas por metales pesados.^{60,68} Esta contaminación es debida en su totalidad a las descargas de grandes cantidades de aguas residuales conteniendo metales, al ambiente y a los mantos acuíferos.⁶⁰

Entre las empresas que contribuyen a la descarga de metales pesados se encuentran: la industria del cuero, industria textil, galvanoplástica, pintura y fabricación de baterías.^{46,64}

Dentro de los metales de mayor interés ambiental, ya que son una amenaza al ambiente y a la salud del hombre debido a su toxicidad, se encuentran los siguientes:

I.1.1.- COBRE

El cobre tiene numerosas aplicaciones en la industria entre las que se encuentran^{63,66}:

- La fabricación de cables.
- La fabricación de monedas, utensilios de cocina y objetos decorativos.
- La fabricación de rayón.
- En pigmentos, insecticidas y fungicidas.

El cobre es un mineral que ha demostrado tener efectos benéficos y potenciales, no obstante, puede presentar efectos tóxicos para la salud del ser humano dependiendo de la cantidad que se ingiera.⁶³

Los niños obtienen el cobre en forma natural a través de su dieta. Este se encuentra en alimentos ricos en minerales como son las verduras, legumbres, cereales, nueces, frutas e incluso chocolates, además de las carnes y los pescados. Se recomienda ingerir de 0.5 a 1 mg diario de cobre dependiendo del peso del niño.⁶³

En los adultos el cobre es defensor de la salud y se recomienda ingerir a diario entre 2 a 4 mg, que debe ser suministrado por vía alimenticia y en mucha menor proporción en el agua que tomamos.⁶³

Este elemento es esencial para la salud del cuerpo humano en condiciones normales (no alteradas en nuestra cadena alimenticia); a diferencia de otros elementos esenciales, es una sustancia que en altas concentraciones puede ser tóxico. Por ejemplo, demasiado cobre en la sangre ha sido asociado con infecciones frecuentes, náuseas, dolores de cabeza, enfermedades hepáticas, leucemia, ataques cardíacos y artritis reumáticas.⁶³

Otras de las consecuencias de la alta acumulación de cobre en el tejido hacen que se presenten activación de enzimas y destrucción de membranas, lo cual puede causar mutaciones del ADN, cirrosis hepática o enfermedades hereditarias como el mal de Wilson y Menkes, que ocasiona la retención de cantidades excesivas de cobre en el hígado. La acumulación de cobre en el sistema nervioso central produce daño neurológico y en algunos aspectos, tiene cierto parecido con la enfermedad de Parkinson, la cual puede acompañarse de manifestaciones siquiátricas, y la aparición en la córnea de un anillo parduzco pericorneal (anillo Kayser-Fleisher).⁶⁴

I.1.2.- CROMO

Más de la mitad de la producción total de cromo se destina a productos metálicos, y una tercera parte es empleada en refractantes. Principalmente se utiliza en la elaboración de aleaciones de hierro, níquel o cobalto. Al añadir el cromo se consigue aumentar la dureza y la resistencia a la corrosión de la aleación. En los aceros inoxidable, constituye el 10% de la composición final.⁶⁶

Debido a su dureza, la aleación de cromo, cobalto y wolframio se emplea para herramientas de corte rápido de metales. Al depositarse electrolíticamente, el cromo proporciona un acabado brillante y resistente a la corrosión.⁶⁶

El cromo es un metal pesado que se acumula en el suelo. Los seres humanos y los animales están expuestos al cromo vía inhalación (en el aire o en el humo de tabaco), a través de la piel (exposición ocupacional) o por ingestión (generalmente de productos agrícolas o en el agua).

La toxicidad sistemática del cromo se debe especialmente a los derivados hexavalentes que, contrariamente a los trivalentes, pueden penetrar en el organismo por cualquier vía con mucha mayor facilidad.⁶⁶

En los lugares cercanos a las industrias que trabajan con compuestos de cromo, se ha observado que los polvos de desecho en el proceso de la fabricación de cromatos así como de los polvos de las chimeneas producen corrosión en la pintura de casas, automóviles, etc.⁶⁶

Los compuestos de cromo pueden ingresar al organismo humano por exposición accidental. Los efectos que presentan son los siguientes:⁶⁶

- Daño gastrointestinal.
- Insuficiencia hepato-renal.
- Lesiones nasales, cutáneas, hepáticas y renales.

La dosis mortal de un cromato soluble como el cromato de potasio, el dicromato de potasio o el ácido crómico es de aproximadamente de 5 g. El límite de exposición para el ácido crómico y cromatos solubles es de 0.05 mg/L.⁶⁶

En el aire no contaminado se encuentra normalmente en concentraciones entre 0.01-0.02 mg/L, niveles que no causan daños a la salud. Sin embargo, la contaminación industrial puede elevar la concentración de cromo en el aire que superan los 0.4 mg/L.⁶⁶

En el agua, los niveles naturales de cromo son bajos, alcanzando en los ríos concentraciones de cromo que varían entre 0.1 a 5 mg/L.⁶⁶

Las actividades y efluentes industriales son los principales contaminantes de los cursos de agua llegando a elevar las concentraciones de cromo hasta 25 mg/L.⁶⁶

Los alimentos constituyen para el hombre la fuente ambiental de cromo natural más importante.

Aportes superiores proporcionados por otros medios como aire y agua, habitualmente se deben a contaminación artificial, correspondiendo principalmente a cromo hexavalente.⁶⁶

I.1.3- NÍQUEL

La mayor parte del níquel comercial se emplea en el acero inoxidable y otras aleaciones resistentes a la corrosión. También es importante en monedas como sustituto de la plata. El níquel finamente dividido se emplea como catalizador de hidrogenación.^{62,66}

Los humanos pueden ser expuestos al níquel al respirar el aire, beber agua, comer o fumar. En pequeñas cantidades el níquel es esencial, pero cuando es tomado en muy altas cantidades puede ser peligroso para la salud humana.⁶²

La toma de altas cantidades de níquel tienen las siguientes consecuencias:⁶²

- Elevadas probabilidades de desarrollar cáncer de pulmón, nariz, laringe y próstata.
- Enfermedades y mareos después de la exposición al gas de níquel.
- Embolia de pulmón.
- Fallos respiratorios.
- Defectos de nacimiento.
- Asma y bronquitis crónica.
- Reacciones alérgicas como son las erupciones cutáneas, mayormente de las joyas.

El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basuras. Éste se deposita directamente en el suelo o después de reaccionar con las gotas de lluvia. Usualmente lleva un largo periodo de tiempo para que este metal sea eliminado del aire. El níquel puede también terminar en la superficie del agua cuando es parte de las aguas residuales. La mayor parte de los compuestos del níquel que son liberados al ambiente se absorben en los sedimentos o partículas del suelo y llegan a inmovilizarse. En suelos ácidos, el níquel se une para llegar a ser más móvil y a menudo alcanza el agua subterránea.⁶²

I.1.4.- PLOMO

El plomo tiene numerosas aplicaciones, aún cuando está siendo reemplazado en algunos de sus mercados tradicionales por materiales plásticos de menor costo, más larga vida útil y, sobre todo, inertes (ej. cañerías).^{66,67}

Entre sus usos más extendidos, se pueden mencionar:⁶⁶

- Conductos para líquidos (aguas, ácidos, etc.).
- Antidetonante en naftas.
- En la obtención de ácido sulfúrico.
- En la fabricación de baterías, pigmentos, productos de alfarería etc.

La exposición de los seres humanos al plomo puede dar lugar a una amplia gama de efectos biológicos dependiendo del nivel y duración de la exposición.⁶⁷

Los diferentes efectos ocurren a diferentes dosis, dependiendo de edad y desarrollo físico del hombre.⁶⁷

La dosis mortal de plomo absorbido se ha estimado en 0.05g. La acumulación y toxicidad aparecen si se absorben más de 0.5mg por día.⁶⁷

Los altos niveles de la exposición pueden dar lugar a efectos bioquímicos tóxicos en los seres humanos que alternadamente causan problemas en la síntesis de la hemoglobina, daño a los riñones, aparato gastrointestinal, sistema reproductivo, y daños agudos o crónicos al sistema nervioso.⁶⁷

En las concentraciones intermedias, sin embargo, hay evidencia persuasiva que conducen a tener efectos pequeños, sutiles, subclínicos, particularmente en progresos neuropsicológicos en niños.

Algunos estudios sugieren que pueda haber una pérdida de hasta 2 puntos del índice de inteligencia para un aumento del nivel de plomo en la sangre a partir de 10 a 20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ en niños y jóvenes.⁶⁷

Aunque la mayoría de la gente adquiere la cantidad más grande de plomo con el alimento, en poblaciones específicas, otras fuentes pueden ser más importantes, por ejemplo el agua, en áreas con instalación de tubos de plomo, el suelo, el polvo, de las escamas de la pintura en casas viejas o de la tierra contaminada.

El plomo en el aire contribuye a elevar los niveles de éste en los alimentos, debido a la deposición del polvo y lluvia que contiene el metal, en las cosechas y el suelo.⁶⁷

I.1.5.- ZINC

El zinc es un elemento poco abundante en la corteza terrestre. El metal se usa principalmente como revestimiento protector contra la corrosión atmosférica, o galvanizado, para el hierro y el acero.⁶⁶

También se utiliza en planchas para cubrir los tejados, como ingrediente en diversas aleaciones como el latón y como componente de las pilas secas.⁶⁶

El óxido de cinc (ZnO), conocido como blanco cinc o blanco Chino, se usa como pigmento en pinturas y plásticos. También como relleno en las llantas de caucho y es empleado en medicina como ungüento antiséptico.⁶⁶

El cloruro de cinc ($ZnCl_2$) se usa para preservar la madera y en soldadura. El sulfuro de cinc (ZnS) es útil en aplicaciones en las que se requiere electroluminiscencia, fotoconductividad y semiconductividad y tiene aplicaciones en electrónica. Se emplea en aparatos de visión nocturna.⁶⁶

La dieta normal del hombre proporciona de 10 a 15 mg de zinc por día, lo que se considera suficiente. Las necesidades varían en función del crecimiento, de la reparación tisular. Las necesidades parecen ser máximas durante la gestación y el desarrollo fetal.⁷¹

La toxicidad aparece con dosis de zinc muy elevadas. La intoxicación por zinc sobreviene con la ingestión exagerada de comidas y bebidas envasadas en latas, así como también por el contacto dérmico con sales de cromato de zinc y la inhalación de vapores de óxido de zinc, produciéndose la denominada fiebre de zinc.

Esto ocurre en las operaciones de fundiciones de latón, entre el personal que trabaja con el hierro galvanizado o planchas de metal y en los fundidores de zinc.⁷¹

El exceso de zinc se denomina hipercincemia y se manifiesta por: lasitud, depresión mental, disminución de los reflejos tendinosos, parexia, vómitos, diarrea, cólico abdominal, enteritis sanguinolenta, modificaciones en el electrocardiograma que aparentan hiperculemia, leucopenia, anemia, aumento de la excreción de nitrógeno urinario y fecal, disminución de la excreción urinaria de azufre y fósforo, uricosuria y ascenso de la excreción de creatinina en la orina.⁷¹

I.2.- Alternativas para la remoción de metales

A la fecha se han realizado gran número de estudios relacionados con la posibilidad de remover y recuperar metales pesados de disoluciones diluidas, fundamentado principalmente en el valor comercial de alguno de ellos, así como por el impacto ambiental causado por los mismos.^{3,38}

Los métodos tradicionales para removerlos incluyen precipitación química, oxidación o reducción química, intercambio iónico, filtración, tratamientos electroquímicos, separación por membrana y evaporación.^{3,7,9,23,26,35,42,46,58}

Estos métodos tienen varios inconvenientes como son alto costo, remoción incompleta, baja selectividad, alto consumo de energía, además de la generación de lodos tóxicos difíciles de eliminar, especialmente cuando los metales están en concentraciones menores de 100 mgL^{-1} .^{7,9,23,26,35,42,58}

Alternativamente se han considerado tecnologías para su remoción y recuperación basadas en materiales naturales de origen biológico.^{7,23,39,53}

La biotecnología es una de las opciones más atractivas para la remoción de metales, con grandes perspectivas, a la cual se le ha puesto atención debido a su gran potencialidad y bajo costo para el desarrollo de nuevas tecnologías eficientes, que se puede aplicar en una gran variedad de esquemas productivos. Entre las cuales se encuentran.^{25,48}

I.2.1.- Fitorremediación:

Consiste en el uso de plantas verdes, incluidas especies leñosas, para contener, remover o neutralizar compuestos orgánicos, metales pesados o radionucléidos.

Esta definición incluye cualquier proceso biológico, químico o físico, inducido por las plantas, que ayude en la absorción, secuestro, degradación y metabolización de los contaminantes, ya sea por las plantas mismas o por los microorganismos que se desarrollan en la rizósfera.²⁵

Entre las técnicas de fitorremediación se destacan:

- La prevención por parte de las plantas, de la migración de los contaminantes al reducir la erosión, y la minimización de los movimientos del agua en el suelo.

I.2.2.- Remediación microbiana

Desde tiempo atrás se conoce que los microorganismos son capaces de remover metales mediante el proceso de biosorción.⁶

Biosorción: Es la eliminación de metales o compuestos metálicos tanto en disolución como formando partículas sólidas insolubles, a través de material biológico.⁶

La biomasa microbiana de cierta flora acuática pueden ser utilizadas en este proceso debido a su capacidad de unirse a los metales.¹⁷

La utilización de microorganismos como biosorbentes de metales pesados, ofrece una alternativa potencial a los métodos ya existentes para la detoxificación y recuperación de metales tóxicos o valiosos presentes en aguas residuales industriales.⁶

Muchas levaduras, hongos, algas y bacterias tienen la capacidad de concentrar metales a partir de disoluciones acuosas diluidas y de acumularlas dentro de la estructura microbiana.^{1,3,6,8,26,35}

Las levaduras han sido desde la antigüedad de gran ayuda para el hombre en diversos procesos. La levadura que fue sin duda la primera y aun hoy en día sigue siendo la más utilizada es *Saccharomyces cerevisiae*.⁷⁰

Esta levadura ha sido clave fundamental de muchas investigaciones entre las que se encuentran la realizada por Omar N. B y cols.⁴¹ quien estudió la biosorción de uranio a un pH de 4.5 demostrando que a concentraciones entre 0.1 y 0.5 molar la biomasa de *S. cerevisiae* fue capaz de remover del 84-98% de este metal en disolución.

Volesky B y May-Philips H. A.⁵² utilizaron biomasa de esta levadura tanto viva como muerta, para el atrapamiento de Zn, Cu, Cd y U a pH óptimo de 4.5. La capacidad del biosorbente obtenida en biomasa viva fue: U > Zn > Cd > Cu y en biomasa muerta: Zn > Cd > U > Cu. El uso de *S. cerevisiae* se ha aprovechado en la industria cervecera para la purificación de ambientes contaminados con metales pesados.

La levadura *Saccharomyces vini* fue estudiada por Sarishvili N. G. y cols.⁴⁹ con la posibilidad de utilizarse como biosorbente de Fe(II) o Cu(II) o mezcla de ellos. La máxima absorción fue observada en la fase de crecimiento exponencial.

La capacidad de sorción de Cu(II) de *Candida utilis* fue evaluada por Zhang, y cols.⁵⁷ quienes observaron que la acumulación del metal por la pared celular de la levadura fue mayor a un 50%.

La capacidad de sorción de Pb(II) en *Rhodotorula glutinis* fue evaluada por Cho D. y Young King E.¹⁰ quienes observaron que a los primeros minutos de contacto biomasa-metal ésta capturaba aproximadamente el 80% del total de Pb(II), además de que el pH óptimo para la sorción estuvo entre 4 y 5.

La levadura *Rhodotorula rubra* es recientemente estudiada para su utilización en la remoción de Cd(II) y Pb(II) de disoluciones acuosas. En investigaciones realizadas por Salinas E; Rezza I. y cols.⁴⁸ se observó que la remoción de Cd(II) y Pb(II) fue afectada significativamente por el pH inicial y determinaron que la remoción de metal aumentaba al incrementar el pH siendo el óptimo entre 4 y 5.

La sorción de iones Ag(I) y de complejos por diferentes cadenas de *Rhodotorula mucilaginosa* fue estudiada por Gomes N. y cols.²² observando que el complejo $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ es estrictamente dependiente de la glucosa, mientras que el complejo AgCN fue inhibido del 16 a 25% al adicionarle glucosa.

I.3.- Características de *Rhodotorula mucilaginosa*

I.3.1 Clasificación Taxonómica.

Esta levadura se encuentra en el aire, tierra, lagos y océanos. En la siguiente tabla se da toda la información taxonómica acerca de la levadura de estudio.⁶⁵

Tabla 2.- Clasificación Taxonómica

Reino	Fungi
División	Basidiomycetes
Clase	Urediniomycetes
Orden	Esporidiales
Familia	Esporidiobolaceae
Género	Rhodotorula

El género *Rhodotorula* incluye tres especies activas: *Rhodotorula glutinis*, *Rhodotorula minuta* y *Rhodotorula mucilaginosa*.⁶⁵

Rhodotorula mucilaginosa es el nombre común para la especie anteriormente conocida como *Rhodotorula rubra*.⁶⁵

I.3.2.- Características Morfoculturales.

Las colonias crecen rápidamente en medios que contiene azúcares, la temperatura de crecimiento es de 28° C, éstas son lisas, brillantes, algunas veces rugosas, suaves y mucosas, de color crema, rosa, rojo coral, naranja o amarillas.⁶⁵

Se presentan blastocodínios que son unicelulares y circulares. Estos blastocodínios se pueden encapsular, hay ausencia o poca presencia de pseudohifas. La formación de hifas está totalmente ausente.⁶⁵

I.3.3.- Característica de la pared celular

En virtud de que el proceso de biosorción es un fenómeno de superficie que depende entre otros factores, de las propiedades de los sitios de unión localizados en la estructura molecular de la pared celular, es necesario conocer las características de ésta.^{38,43}

Una de las características que distingue a las células microbianas de las animales, es la pared celular localizada fuera de la membrana citoplasmática de la célula.

Esta estructura, protege al microorganismo contra las inclemencias del ambiente, controla el flujo entre el citoplasma y los alrededores, determina la forma y rigidez de la célula. Además está directamente en contacto con el ambiente externo a la célula e interacciona especialmente con las sustancias solubles en el medio líquido. Ésta interacción puede ser muy pronunciada en el caso de los iones metálicos debido a las características aniónicas de la pared celular, la cual es químicamente compleja y característica de cada tipo de organismo y puede diferir entre especies del mismo género. Los microorganismos tienen una gran cantidad de grupos funcionales en la superficie de la pared celular con capacidad para unir iones metálicos.³⁸

Estos grupos funcionales contribuyen a definir la carga del microorganismo y entre ellos se incluyen carboxilos, aminos, imidazol, fosfatos, sulfhídricos, sulfatos, hidroxilos entre otros.^{23,26,38}

La carga neta de la pared celular del microorganismo es negativa debido a la abundancia de carboxilos y fosfatos, sin embargo debido a la presencia de los grupos aminos e imidazol, los cuales tienen carga positiva, las paredes celulares se consideran como polifuncionales en cuanto a capacidad para unir metales.³⁸

La presencia de los grupos funcionales no garantiza la accesibilidad de los cationes debido a limitaciones esféricas y conformacionales.^{23,26,38}

La naturaleza y número de grupos cargados en la superficie de la célula y la naturaleza del medio en el cual se encuentran, define la carga de las células en suspensión.³⁸

I.4.- Mecanismo de la biosorción

La biosorción se lleva a cabo cuando un metal se une a la pared celular. Es primariamente un fenómeno debido a fuerzas intermoleculares entre el ión metálico (catión) y los sitios de unión (aniones) de la pared celular. Esto es, la unión del metal es un proceso exocelular o pericelular que consta de las siguientes etapas:³⁸

- Transporte del catión a la superficie de la pared.
- Deposición.

- Captación en la superficie en la pared celular.
- Debido a la naturaleza de las fuerzas, el fenómeno es fácilmente reversible.

Como ya se mencionó, existen varios mecanismos por los cuales los metales se unen a la pared celular. Estos mecanismos son: complejación, intercambio iónico, quelación, precipitación, adsorción, o bien el atrapamiento iónico en los espacios de la red polisacárida que conforman la estructura de las paredes celulares y membrana.^{25,26,37-41,46,51,52}

La adsorción implica atracción electrostática, fuerzas de Van der Waals y enlaces covalentes. La atracción electrostática generalmente implica una reacción de intercambio iónico.³⁸

Los iones metálicos han sido clasificados en función de una escala de dureza ácida definida por su fuerza de unión con los iones F^- y I^- , llamada escala de Pearson. Los iones metálicos que forman uniones fuertes con F^- se denominan ácidos duros y entre ellos están Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} los cuales se encuentran en grandes cantidades en los organismos vivos.³⁸

Los iones blandos se encuentran al otro extremo y se encuentran el Hg^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} que son considerados tóxicos. Los iones de un grado de dureza intermedio por ejemplo Zn^{2+} , Co^{2+} son menos tóxicos.^{53,56}

En sistemas biológicos los iones duros forman enlaces estables con grupos OH^- , HPO_4^{2-} , CO_3^{2-} , $R-COO^-$; los iones blandos por su parte forman enlaces fuertes con grupos CN^- , $R-S^-$, SH^- , NH_2^- e imidazol. La unión de los iones duros es de naturaleza iónica, mientras que la de los iones blandos es de carácter covalente.^{38,53}

El proceso de biosorción se lleva a cabo en un sistema acuoso y éste puede ser caracterizado por parámetros fisicoquímicos tales como ácido-básicos, potencial de oxido-reducción y agentes acomplejantes.³⁸

Los metales en disolución no están presentes únicamente como iones libres, sino que interactúan con otros iones llamados ligandos para formar complejos.³⁸

Las paredes celulares son polielectrolitos que están siempre acompañados de contraniones requeridos para mantener la electroneutralidad, lo que explica la razón de las interacciones entre las superficies de los microorganismos y los iones metálicos.³⁸

I.5.- Factores que afectan la biosorción

La capacidad de biosorción es afectada por factores tanto químicos como físicos los cuales son:^{5,9,25}

- El potencial de Hidrógeno.
- La concentración de biomasa.
- El tipo y la concentración de metal.
- La temperatura.
- La concentración de cationes.

I.5.1.- Potencial de Hidrógeno.

A bajos valores de pH en donde existe una alta concentración de protones, los cationes metálicos y los protones compiten por los sitios de unión de la pared celular, lo cual da como resultado que debido a fuerzas de repulsión, la captura del metal disminuya; conforme el pH se incrementa, se exponen más sitios de unión con carga negativa, lo cual da como resultado que la atracción por iones cargados positivamente se incrementa; en virtud de que ha sido observado que aún a bajos valores de pH ocurre la captura de iones positivamente cargados, se sugiere también que el mecanismo de adsorción se debe a fenómenos no electrostáticos.³⁸

I.5.2.- Concentración de biomasa

Estudios realizados por Itoh y cols.³¹ y Fourest and Roux¹⁵ revelan una disminución de la capacidad de adsorción conforme aumenta la concentración celular. Este efecto puede deberse a que ocurren interacciones electrostáticas entre las células, lo cual podría causar una disminución en los sitios de unión de la pared celular por el aglomeramiento de éstas; es decir, conforme la distancia entre las células es mayor, se adsorbe una mayor cantidad de cationes, en contraposición se ha planteado que este fenómeno es debido a la desproporción que se genera por falta de metal en la disolución.

I.5.3.- Temperatura

Cuando las células metabólicamente activas son usadas como adsorbentes en la sorción de metales se observa que tiene un efecto en la captación del metal a temperaturas particularmente entre los 40-55°C. Mientras que al utilizar células metabólicamente inactivas como adsorbentes en procesos de biosorción no se observa efecto de la temperatura en la captación del metal, particularmente a temperaturas entre los 25-40° C^{38,48}

I.5.4.- Presencia de otros metales.

La captación del metal por biomasa metabólicamente inactiva, es significativamente afectada por la presencia y concentración de otros cationes en la disolución, dependiendo de las interacciones químicas de las otras especies iónicas con el metal de interés y la biomasa. Muchos de los grupos funcionales presentes en la pared celular son no específicos y los diferentes cationes compiten por los sitios de unión.³⁸

I.6.- Modelos matemáticos para el análisis de adsorción.

Considerando la pared celular como un material aniónico, el proceso de captura de cationes puede referirse como una operación de adsorción, la cual es un método de separación útil para recuperar solutos que están en disoluciones diluidas.³⁸

Esta operación puede analizarse utilizando modelos como los de Langmuir o Freundlich considerando el establecimiento de las relaciones de equilibrio, la rapidez de adsorción, los balances de masa y de energía del sistema.³⁸

Las relaciones de equilibrio se obtienen graficando en las abscisas la concentración de soluto en equilibrio en la disolución y en las ordenadas la concentración en equilibrio en la superficie del adsorbente.³⁸

El modelo de Freundlich propone una sorción de monocapa con una distribución energética heterogénea de sitios activos y con la interacción entre las moléculas sorbidas, la cual se describe por la ecuación³⁸

$$q = Ky^{1/n} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

q es la cantidad de soluto adsorbido por cantidad de adsorbente

y es la concentración de soluto en la solución

n es una constante adimensional

K es la constante de equilibrio cuyas unidades dependen de n .

La ecuación de Langmuir fue descubierta por Irving Langmuir en 1918 y describe la adsorción de moléculas gaseosas en una superficie plana. El modelo de Langmuir sugiere, como una hipótesis, que la unión ocurre en una superficie homogénea por una sorción de monocapa sin interacciones entre las moléculas sorbidas. Este modelo es descrito por la ecuación:³⁸

$$q = \frac{q_m b C_{eq}}{1 + b C_{eq}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde

q_m es la máxima capacidad de sorción,

b es el coeficiente de actividad,

C_{eq} es la concentración del metal en la disolución en equilibrio y

q es la capacidad de sorción

I.7.- Métodos Analíticos.

I.7.1.- Espectroscopía de Absorción Atómica

Es el método espectral atómico mas utilizado en los últimos años debido a su simplicidad, efectividad y bajo costo relativo.

El instrumento de espectrofotometría de absorción atómica se utiliza para analizar la concentración de metales en disolución mediante la absorción de luz por átomos libres.

FUNDAMENTO

La espectrofotometría de absorción atómica se basa en que una muestra es atomizada y aspirada a través de una llama, mediante un monocromador se dirige un rayo de luz a través de la llama y sobre un detector se mide la cantidad de luz absorbida.

Componentes de un instrumento de absorción atómica

QUEMADOR

Su función es generar la flama en la cual se atomizará la muestra. La temperatura que alcanza la flama depende de los gases oxidante y combustible. Los gases que mas se utilizan son el aire-acetileno y el óxido nitroso-acetileno.

FUENTE

Una de las fuentes más utilizadas es la lámpara de cátodo hueco debido a que la anchura de banda de ésta es estrecha con respecto a la anchura de un pico de absorción, esto es para que se cumpla la Ley de Beer.

La lámpara de cátodo hueco consiste en un ánodo de tungsteno y un cátodo cilíndrico cerrado herméticamente en un tubo de vidrio lleno de neón o argón a una presión de 1 a 5 torr. El cátodo está constituido con el metal cuyo espectro se desea obtener.

Una parte de los átomos metálicos desprendidos se encuentra en estados excitados y de este modo al volver al estado fundamental emiten una radiación característica la cual será absorbida por los átomos en el quemador.

Al final los átomos metálicos se vuelven a depositar difundiendo de nuevo hacia la superficie del cátodo o hacia las paredes del vidrio del tubo.

MONOCROMADOR

Uno de los monocromadores más utilizados en absorción atómica es el de Czerny – Turner, el cual consta de una rendija de entrada que proporciona una imagen óptica rectangular, una lente o espejo colimador que produce un haz paralelo de radiación, una red de reflexión que dispersa la radiación en sus longitudes de onda individuales, un elemento focalizador que forma de nuevo la imagen de rendija y la enfoca en una superficie plana denominada plano focal y una rendija de salida en el plano focal, que aísla la banda espectral deseada. La radiación que entra en el monocromador a través de una estrecha abertura rectangular o rendija, se colima y entonces incide en la superficie del elemento dispersante con un ángulo dado.

DETECTOR

El detector más ampliamente utilizado en la espectrofotometría de Absorción Atómica es un tubo fotomultiplicador. Este consta de un cátodo sobre el cual incide una radiación de longitud de onda igual a la que emite el elemento analizado; además consta de nueve electrodos adicionales llamados dínodos. El dínodo uno se mantiene un potencial de 90 V por encima del cátodo y por tanto los electrones son acelerados hacia él. Al incidir en el dínodo cada fotoelectrón origina la emisión de varios electrones adicionales; éstos a su vez son acelerados hacia el dínodo dos, el cual está a 90 V por encima que el del dínodo uno. De nuevo, por cada electrón que incide en la superficie se emiten varios electrones. Después de repetirse este proceso por nueve veces, se origina de 10^6 a 10^7 electrones por cada fotón; esta cascada se recoge al final en el ánodo. La corriente resultante se amplifica electrónicamente y se mide.

JUSTIFICACIÓN

Como resultado de la actividad industrial y del desarrollo tecnológico, las descargas de agua conteniendo metales pesados han aumentando continuamente, colocándolas como una amenaza significativa a la salud y al ambiente a causa de su toxicidad, su acumulación en la cadena alimenticia y a su persistencia en la naturaleza.

Monterrey es una zona altamente industrializada y con elevada población, por lo que requiere de grandes cantidades de agua para su desarrollo, de manera que es indispensable trabajar en la creación, innovación y mejora de tecnologías para su descontaminación.

En este proyecto se evalúa la capacidad de metalosorción de la biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* bajo diferentes condiciones, a fin de obtener conocimientos que permitan proponer la biomasa de esta levadura como una alternativa limpia y económica para la eliminación de metales pesados en el tratamiento de aguas residuales.

HIPÓTESIS

Debido a sus características es posible que la biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* pueda ser utilizada para la remoción de metales pesados Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II), y Zn(II), mediante el proceso de biosorción.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de sorción de biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* en los metales Cu(II), Cr(VI), Ni(II), Pb(II) y Zn(II) en disoluciones acuosas bajo diferentes condiciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mantener la viabilidad y capacidad de sorción del microorganismo.

Producir la biomasa.

Evaluar la capacidad de sorción de Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II), y Zn(II) en disoluciones acuosas sintéticas utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Valorar la influencia de algunos factores que afectan dicho proceso tales como:

- El tiempo de contacto.
- La cantidad de biomasa.
- La concentración inicial de los metales.
- La presencia de dos o más metales en mezclas binarias, terciarias y polimetálicas.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

II.1.- Ubicación

El desarrollo de la presente investigación se realizó con el apoyo del proyecto PAICYT CN-728-02 y fue llevado a cabo en las instalaciones del Centro de Laboratorios Especializados de la Facultad de Ciencias Químicas de la U.A.N.L., teniendo como base de operaciones el Laboratorio de Biotecnología. Así mismo para la parte analítica se contó con el apoyo del Laboratorio de Síntesis Orgánica.

II.2.- Mantenimiento de la viabilidad y capacidad de sorción del microorganismo

Con el propósito de mantener la viabilidad y capacidad metalosorbente los cultivos puros previamente obtenidos de una muestra de un ecosistema contaminado con metales pesados fueron sembrados en Agar Sabouraud Dextrosa suplementados con 50 mgL^{-1} metales Cd(II), Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II), se incubaron a 28°C por 48 a 72 h se checó su pureza y se guardaron en refrigeración. Se realizaron resiembras mensuales para el mantenimiento de la cepa pura.

II.3.- Obtención de la Biomasa

II.3.1.-Preparación del inóculo

A partir del cultivo puro de la cepa de *Rhodotorula mucilaginosa* se inocularon 10^6 células en matraces que contenían el medio de cultivo descrito en la tabla 3 y se incubaron por 3 días en agitación a 120 rpm a temperatura ambiente.

Tabla 3.- Composición del Medio de cultivo

Glucosa	2.5%
KH_2PO_4	1.25%
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.5%
Extracto de levadura	1%
Agua Bidestilada	100mL

II.3.2.- Propagación de la levadura

Se llevó a cabo en un fermentador de 14 litros conteniendo 6 litros del medio (tabla 3) el cual se esterilizó en autoclave a 121°C por 15 minutos a 15 lb/in², después se dejó enfriar y se inoculó con 120 mL del cultivo de levadura, en condiciones de asepsia, para posteriormente llevar a cabo la propagación de la levadura a temperatura ambiente con una aireación de 1 VVM y agitación de 120 rpm.

II.3.3.- Producción del biosorbente

La biomasa fue separada por filtración, lavada con buffer de ácido acético/acetato y posteriormente fue secada a 60°C en una estufa Lab-line LC-oven Mod. 3513. Finalmente fue molida obteniéndose un polvo fino, el cual fue guardado en recipientes cerrados para su posterior utilización.

II.4.- Preparación de las disoluciones de los metales

A partir de disoluciones de cromo(VI), cobre(II), níquel(II), plomo(II) y cinc(II) de 10,000 mgL⁻¹ se tomó una alícuota para preparar un stock de 1,000 mgL⁻¹ del cual se elaboraron los estándares de calibración de las concentraciones especificadas en el manual del equipo de AAS (tabla 4). Además se prepararon disoluciones de las concentraciones 50, 120, 240, 480 mgL⁻¹ necesarias para los experimentos.

Tabla 4.- Concentración de los estándares para la curva de calibración

Metal	Concentración (mgL ⁻¹)
Cd	0.2-1.2
Cr	10-90
Cu	10-50
Ni	10-90
Pb	10-250
Zn	0.6-1.4

II.5.- Valoración del efecto de factores

II.5.1.- Tiempo de contacto Biomasa-metal.

Se colocaron en tubos de ensayo, 10 mg de la biomasa, en 10 mL de la disolución de los metales cromo(VI), cobre(II), níquel(II), plomo(II) y cinc(II) de concentración de 50 mgL^{-1} . Estos se pusieron en un agitador mecánico Mod. VS56933 por un lapso de 2 horas, tomando muestra a los 5, 20 y 120 minutos. Las muestras fueron filtradas y se determinó la concentración residual del metal en el sobrenadante por la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS) en un equipo de Absorción Atómica Marca GBC Mod. 932AA. Se realizaron tres réplicas de cada experimento.

II.5.2.- pH y concentración inicial del metal

10 mg de biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* fueron puestos en contacto con 10 mL de disoluciones de los metales cromo(VI), cobre(II), níquel(II), plomo(II) y cinc(II) en concentraciones de $5\text{-}500 \text{ mgL}^{-1}$ a pH 2, 5 y 7. Se colocaron en agitación por dos horas y posteriormente las muestras fueron filtradas. Se determinó la concentración residual del metal en los sobrenadantes por la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica. Los datos obtenidos fueron aplicados para la elaboración de las isotermas experimentales, a diferentes pH. Se realizaron tres réplicas de cada experimento

II.5.3.- Concentración de biomasa en la sorción

Se pusieron en contacto concentraciones de biomasa de $2.5\text{-}30 \text{ mg}$ con 10 mL de la disolución de los metales cromo(VI), cobre(II), níquel(II), plomo(II) y cinc(II) de 50 mgL^{-1} al pH en el que se favoreció la sorción de acuerdo al experimento anterior. Se colocaron en agitación por dos horas y posteriormente las muestras fueron filtradas, se determinó la concentración residual del metal en los sobrenadantes por la técnica de AAS. Se realizaron tres réplicas de cada experimento

II.6.- Valoración de la sorción de *Rhodotorula mucilaginosa* en disoluciones polimetálicas.

Se pusieron en contacto 10 mg de biomasa con 20 mL de muestras de las soluciones sintéticas binarias, terciarias y de los seis metales (tabla 5) conteniendo concentraciones iguales de Cd(II), Cr(IV), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II) de 50mgL^{-1} a pHs 2.0, 5.0 y 7.0. Las muestras de las disoluciones de los metales con la biomasa fueron retiradas después de 2 horas de contacto y se analizó la concentración residual del metal por la técnica de AAS. Se realizaron tres réplicas de cada experimento.

Tabla 5.- Mezclas sintéticas de metales.

Mezclas Binarias	Mezclas Ternarias	Seis Metales
Cr y Pb pH 2	Zn, Ni y Cr pH 2	Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn pH 2
Cr y Pb pH 5	Zn, Ni y Cr pH 5	
Cd y Pb pH 5	Pb, Cd y Cu pH 5	Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn pH 5
Ni y Pb pH 5	Pb, Cd y Zn pH 5	
Zn y Cu pH 5	Ni, Pb y Cu pH 5	

II.7 Técnicas Analíticas

Procedimiento de medición de la concentración de metal

Para determinar la concentración de metal residual, el sobrenadante se separó de la biomasa por decantación y filtración, y la concentración residual fue medida en el equipo de absorción atómica de la siguiente forma.

OPERACIÓN DEL EQUIPO DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Se enciende el software del espectrofotómetro y se espera unos minutos a que se estabilice la corriente del aparato. Se abren los cilindros contenedores de los gases que son utilizados en la determinación, y se controlan los flujos que son requeridos por el aparato de absorción atómica y el generador de hidruros.

Las presiones utilizadas son: Aire 55 psi (oxidante), Acetileno 9 psi (combustible). Se introduce la lámpara de cátodo hueco correspondiente al metal a determinar.

Se enciende el aparato de absorción atómica. La lámpara queda colocada y el haz de luz pasa aproximadamente por el centro de la ventana debido a que el equipo así está diseñado.

Se colocó el quemador adecuado para una llama de aire-acetileno, se ajustó la lámpara de cátodo hueco para obtener un máximo de intensidad y dando "click" en **Peak EHT + D2**.

De igual forma se ajusta la lámpara de Deuterio, que es la que corrige el ruido. El haz de luz se ajustó con tarjeta Varian, para que pase por el centro del círculo de la tarjeta, moviendo los botones horizontal y vertical del quemador.

El quemador se ajustó moviéndolo hacia abajo para colocar sobre él la celda de cuarzo, y que el haz de luz pase por el centro de ésta.

Se enciende la flama de aire-acetileno con **Ignition**, se enciende el generador de hidruros y se colocan los canales de la muestra, ácido y reductor en los recipientes correspondientes.

Se calibra el equipo colocando en el capilar de la muestra el blanco de calibración y dando "click" en **Perform Instrument Zero**, así también se mide el estándar de concentración media. Se introduce el capilar para que aspire los estándares y las muestras en el orden en que se capturaron en el programa. Se tecllea OK para realizar.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se logró mantener la pureza, viabilidad y la capacidad de sorción del microorganismo resembrando mensualmente.

Rhodotorula mucilaginosa creció satisfactoriamente en el medio seleccionado obteniéndose a nivel fermentador la producción 1gL^{-1} de la biomasa.

La capacidad de sorción, q (mg/g), es el parámetro mediante el cual se evalúa la calidad de la biomasa para remoción de metales pesados (Wase y Foster)⁵⁵. El valor de q es calculado considerando el volumen utilizado, la cantidad de biomasa, las concentración inicial y la concentración final de metal, esta última es llamada también concentración de equilibrio de sorción (Ec. 2).

Para determinar el tiempo que la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* requiere para llegar al equilibrio de sorción se realizó la valoración del efecto del tiempo de contacto sobre la capacidad de remoción de la biomasa para los metales cromo(VI), cobre(II), níquel(II) cinc(II) y plomo(II). Por lo general la bioadsorción es un proceso rápido que ocurre entre los primeros 30 minutos de contacto biomasa y disolución de metales (Gadd)¹⁹. Este ocurre a través de diversos mecanismos como: complejación superficial, quelación, intercambio iónico, adsorción, microprecipitación o bien el atrapamiento iónico en los espacios de la red polisacárida que conforman la estructura de las paredes celulares.

En la figura 1 se muestran los resultados de la variación de la concentración de metal residual a medida que transcurre la sorción, utilizando diferentes concentraciones iniciales de cada uno de los cuatro metales en estudio.

Se observa una tendencia similar en las cuatro gráficas presentadas (a, b, c, y d), en los primeros minutos de contacto se presenta una alta remoción y posteriormente la variación de la concentración de metal residual disminuye, lo que indica que a medida que transcurre el tiempo de contacto biomasa- metal, la capacidad de remoción de la biomasa disminuye.

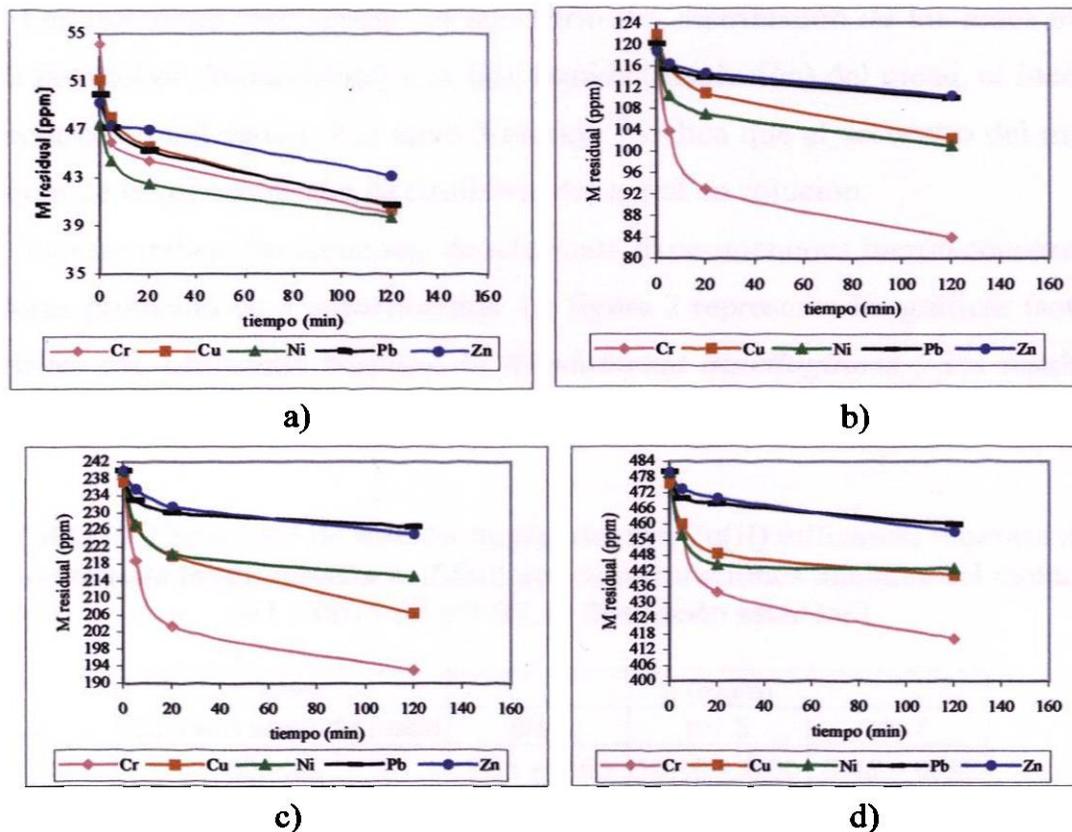


Figura 1.- Efecto del tiempo de contacto en la sorción de Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II) por biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* utilizando diferentes concentraciones de metal: a) 50 mgL⁻¹, b) 120 mgL⁻¹, c) 240 mgL⁻¹, d) 480 mgL⁻¹.

En la Fig. 1 se observa que la mayor remoción de los cinco metales estudiados es independientemente de la concentración inicial utilizada y en todos los casos se da en los primeros 20 minutos de sorción, posteriormente, la concentración del metal residual se mantiene casi constante lo que es indicativo de que el proceso llegó al equilibrio. Lo anterior coincide con lo reportado por varios autores entre ellos se encuentran: Salinas y cols.⁴⁸, Çeribasi y Yetis⁹, Horsfall y cols.²⁸, los cuales obtuvieron que la mayor sorción se obtiene en los primeros minutos de contacto biomasa-metal. Sin embargo otros investigadores reportan tiempos mayores que los obtenidos en este estudio tales como, Grupta²⁴ 2 a 120 min., Hamdy²⁷ 2h. y Kaewsarn³² 35 min.

La relación entre la cantidad de metal removido de una disolución por un sorbente y la concentración de equilibrio a una temperatura constante se denomina isoterma de adsorción. Éstas se construyen experimentalmente, al poner en contacto una cantidad de biomasa constante con disoluciones metálicas de diferentes concentraciones y midiendo así el efecto sobre la capacidad de bioadsorción.

Las isotermas representan el equilibrio de distribución de los iones metálicos entre la fase sólida (biosorbente) y la fase líquida (disolución) del metal, al incrementar la concentración del catión. Por tanto Volesky ⁵⁶ indica que el secuestro del metal está en función de la concentración de equilibrio del metal en solución.

En este trabajo las isotermas de adsorción experimentales fueron construidas con los valores promedio de 3 experimentos. La figura 2 representa las gráficas isotérmicas a diferentes pH, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* y los resultados se muestran en las tablas (6, 7, 8, 9, 10).

Tabla 6.- Capacidad de sorción (mg/g) del ión Cu(II) utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* a diferentes concentraciones iniciales del metal y a pH 2.00, 5.00 y 7.00. (\pm Desviación estándar.)

Cobre	q (mg/g)		
	pH 2	pH 5	pH 7
Concentración de metal			
50 mgL ⁻¹	9,11 \pm 0,65	10,68 \pm 0,60	5,45 \pm 0,52
120 mgL ⁻¹	18,02 \pm 0,82	19,37 \pm 0,98	9,17 \pm 0,86
240 mgL ⁻¹	29,24 \pm 0,89	31,35 \pm 0,99	10,45 \pm 0,51
480 mgL ⁻¹	30,90 \pm 0,76	35,63 \pm 0,60	17,85 \pm 0,42

Tabla 7.- Capacidad de sorción (mg/g) del ión Cr(VI) utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* a diferentes concentraciones iniciales del metal y a pH 2.00, 5.00 y 7.00. (\pm Desviación estándar.)

Cromo	q (mg/g)		
	pH 2	pH 5	pH 7
Concentración de metal			
50 mgL ⁻¹	13,73 \pm 0,51	11,53 \pm 0,24	5,95 \pm 0,14
120 mgL ⁻¹	34,75 \pm 0,91	16,70 \pm 0,69	9,97 \pm 0,58
240 mgL ⁻¹	45,86 \pm 0,39	19,84 \pm 0,49	17,08 \pm 0,61
480 mgL ⁻¹	63,73 \pm 0,71	20,41 \pm 0,69	19,87 \pm 0,18

Tabla 8.- Capacidad de sorción (mg/g) del ión Ni(II) utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* a diferentes concentraciones iniciales del metal y a pH 2.00, 5.00 y 7.00. (\pm Desviación estándar.)

Níquel	q (mg/g)		
	pH 2	pH 5	pH 7
Concentración de metal			
50 mgL ⁻¹	4,86 \pm 0,13	7,87 \pm 0,76	7,20 \pm 0,54
120 mgL ⁻¹	13,22 \pm 0,24	18,35 \pm 0,71	11,78 \pm 0,70
240 mgL ⁻¹	21,98 \pm 0,57	25,50 \pm 0,41	24,83 \pm 0,83
480 mgL ⁻¹	24,44 \pm 0,76	36,96 \pm 0,82	30,26 \pm 0,91

Tabla 9.- Capacidad de sorción (mg/g) del ión Pb(II) utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* a diferentes concentraciones iniciales del metal y a pH 2.00, 5.00 y 7.00. (\pm Desviación estándar.)

Plomo concentración de metal	q (mg/g)		
	pH 2	pH 5	pH 7
50 mgL ⁻¹	5,07 \pm 0,95	9,30 \pm 0,67	4,26 \pm 0,15
120 mgL ⁻¹	6,00 \pm 0,19	10,23 \pm 0,31	5,09 \pm 0,32
240 mgL ⁻¹	8,93 \pm 0,38	13,20 \pm 0,38	6,15 \pm 0,31
480 mgL ⁻¹	12,49 \pm 0,32	20,15 \pm 0,26	8,97 \pm 0,65

Tabla 10.- Capacidad de sorción (mg/g) del ión Zn(II) utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* a diferentes concentraciones iniciales del metal y a pH 2.00, 5.00 y 7.00. (\pm Desviación estándar.)

Zinc concentración de metal	q (mg/g)		
	pH 2	pH 5	pH 7
50 mgL ⁻¹	3,52 \pm 0,08	6,15 \pm 0,53	5,14 \pm 0,70
120 mgL ⁻¹	5,46 \pm 0,25	7,97 \pm 0,42	10,45 \pm 0,66
240 mgL ⁻¹	13,19 \pm 0,42	14,44 \pm 0,21	12,52 \pm 0,84
480 mgL ⁻¹	15,12 \pm 0,79	24,73 \pm 0,17	19,94 \pm 0,39

A medida que la concentración del metal aumenta, la capacidad de sorción (q mg/g) se incrementa, observándose la misma tendencia en los cinco metales estudiados (Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II)) y a los diferentes pH, probados (2, 5 y 7).

Se percibe en las gráficas de las isotermas un ensanchamiento lo cual es indicativo de la disminución de sitios disponibles para la unión de los metales. Lo anterior se puede explicar debido a que al aumentar la concentración de metal sin variar la concentración biomasa, la superficie celular tiende a saturarse.

En la Fig. 2 también se observa que la sorción de Cr(VI) es favorecida por el pH ácido (pH 2) esto coincide con investigaciones realizadas por Loukidou y cols., (2004)³⁶ quien obtuvo que la sorción de Cr(VI) en *Aeromonas cavaie* es favorable a pH 2. Para el resto de los cationes la mayor sorción se muestra a pH 5, no obstante la sorción de Ni(II) y Zn(II) no muestra diferencias notorias a los distintos pH's. En cambio para el Cu(II) y Pb(II) se observa que la sorción a pH 7 disminuye 49.90% y 55.48% respectivamente en relación a la obtenida a pH 5. Lo anterior se puede explicar en función de la carga superficial de la pared celular y de la disponibilidad del metal.

A valores bajos de pH la sorción se ve afectada debido a que existe una alta concentración de protones y/o iones hidronio los cuales compiten con los iones metálicos por los sitios de unión y como consecuencia debido a fuerzas de repulsión la captura del metal disminuye, mientras que a valores altos de pH la sorción es ligeramente menor que a pH 5 debido a que el metal esta menos disponible, como consecuencia de interacciones entre los iones metálicos y los ligandos existentes en la disolución.

Para especies aniónicas como en el caso de CrO_4^{2-} la situación es diferente cuando los valores de pH decrecen su sorción aumenta. Este efecto se explica porque se incrementa la unión de los protones a los sitios activos, mientras que se aumentan las uniones aniónicas.

Otro de los aspectos por los cuales se unen estos aniones es el punto isoeléctrico de la pared celular, el cual se encuentra entre valores de pH de 3 y 4, de este modo la carga neta de la pared celular bajo condiciones en donde el pH está por debajo del punto isoelectrico, promueve el fácil acceso de los aniones a los sitios de unión cargados positivamente.

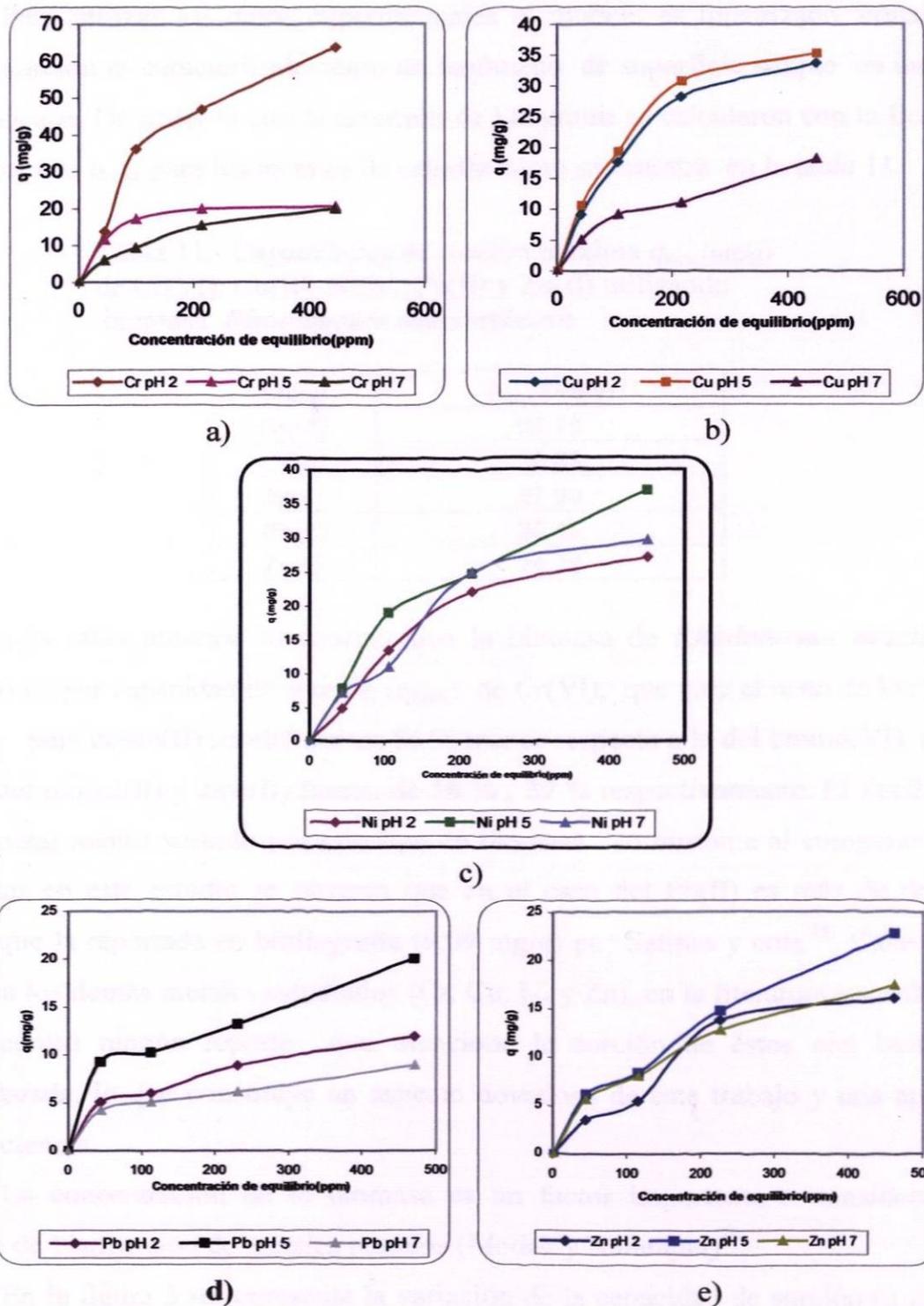


Figura 2.- Isotermas de Adsorción (5-500ppm; pH's 2.0, 5.0 y 7.0) de los metales: a) Cr(VI), b) Cu(II), c) Ni(II), d) Pb(II) y e) Zn(II) utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Estas isotermas se ajustaron al modelo de Langmuir, el cual corresponde a la siguiente ecuación:

$$q = q_{\max} b C_{eq} / (1 + b C_{eq})$$

Para utilizar los datos experimentales el modelo es linearizado, considerando que la sorción es caracterizada como un fenómeno de superficie simple en un sistema de monocapa. De acuerdo con la ecuación de Langmuir se calcularon con la Ecuación 2 los valores de q_{max} para los metales de estudio como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11.- Capacidades de sorción máxima q_{max} (mg/g) de Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II) utilizando biomasa *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	q_{max} (mg/g)
Cr(VI)	63.73
Cu(II)	35.63
Ni(II)	37.00
Pb(II)	20.15
Zn(II)	24.73

En la tabla anterior se observa que la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* presentó mayor capacidad de sorción (q_{max}) de Cr(VI), que para el resto de los metales. La q_{max} para cobre(II) resultó ser un 56 % menor respecto a la del cromo(VI), mientras que la del níquel(II) y zinc(II) fueron de 58 % , 39 % respectivamente. El Pb(II) resultó ser el metal menos sorbido por este tipo de biomasa. No obstante al comparar las q_{max} obtenidas en este estudio se observa que en el caso del Pb(II) es más de dos veces mayor que la reportada en bibliografía (9.09 mg/g) por Salinas y cols.⁴⁸. Cabe destacar que para los demás metales estudiados (Cr, Cu, Ni y Zn), en la literatura consultada, no se encontró ningún reporte que mencione la sorción de éstos con biomasa de *Rhodotorula*, lo que constituye un aspecto novedoso de este trabajo y una aportación para la ciencia.

La concentración de la biomasa es un factor importante a considerar en el proceso de biadsorción de metales pesados (Modak y Natarajan)³⁹.

En la figura 3 se representa la variación de la capacidad de sorción (q mg/g) (a) así como porcentaje de metal removido (b), a diferentes concentraciones de biomasa.

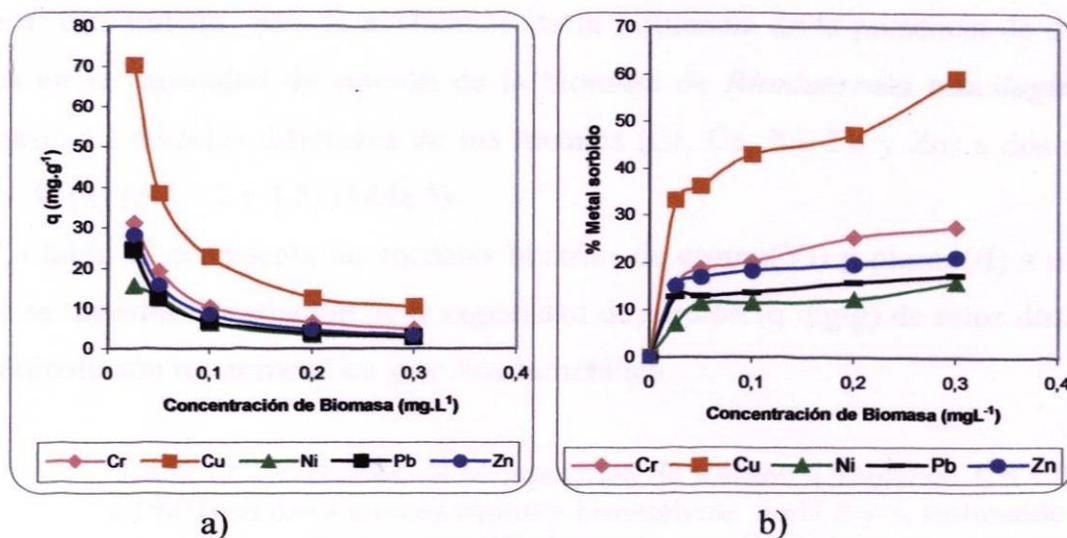


Figura 3.- Efecto de la concentración de biomasa sobre la sorción de Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II) en biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*. (a) Capacidad de sorción, (b) Porcentaje de metal sorbido.

Se observa un comportamiento similar en todos los metales, cuando la concentración de biomasa aumenta la capacidad de sorción (q mg/g) decrece, este efecto se da porque al aumentar la concentración de biomasa existen interacciones electrostáticas entre las células, causando una disminución en la disponibilidad de los sitios de unión de la pared celular debido al aglomeramiento de éstas. Lo anterior coincide con investigaciones realizadas con *Saccharomyces cerevisiae* por Gadd y White¹⁸, *Rhizopus arrhizus* por Fourest y Roux¹⁵ y *Pseudomonas* sp por Pons y Fouste⁴⁵.

Cabe destacar que en este estudio se utilizó una concentración de biomasa (0.025g/L) muy inferior a la reportada por otros investigadores; 1gL^{-1} (Volesky y May-Phillips)⁵², 2gL^{-1} (Huang y cols.)³⁰ y 6.5gL^{-1} (Galún y cols.)²⁰.

La captación de metales por biomasa metabólicamente inactiva, es significativamente afectada por la presencia y concentración de otros cationes en la disolución, dependiendo de las interacciones químicas de otras especies iónicas con el metal de interés.

Muchos de los grupos funcionales presentes en la pared celular son no específicos y los cationes compiten por los sitios de unión. Por lo que, De Carvalho¹³, Gadd y White¹⁸, Garnham²¹, Grupta²⁴, Çeribasi⁹, Hamdy²⁷, Kaewsarn³², Townsley⁵⁰, Volesky⁵⁴ y Zhou y Kiff⁵⁹ nos expresan que la captación del metal de disoluciones multimetálicas es menor que en las que una sola especie está presente.

En este trabajo para la evaluación de la influencia de la presencia de diferentes metales en la capacidad de sorción de la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* se prepararon 12 mezclas diferentes de los metales (Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) a dos distintos valores de pH (pH = 2 y 4.5) (tabla 5).

La tabla 12 representa las mezclas binarias de cromo(VI) y plomo(II) a pH 2 y 5. En ella se muestra la variación de la capacidad de sorción (q mg/g) de estos dos metales en una disolución monometálica y en una bimetálica.

Tabla 12.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Cr(VI) y Pb(II) en disoluciones mono y bimetálicas a pH 2 y 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema monometálico	Metal	Sistema Binario
	q (mg/g)		q (mg/g)
			pH 2
Cr pH 2	63,73	Cr	17,02
Cr pH 5	20,41	Pb	4,92
Pb pH 5	20,15		pH 5
Pb pH 2	12,49	Cr	12,46
		Pb	5,32

En la tabla 12 se observa que en una disolución monometálica la capacidad de sorción de cromo(VI) por la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* es 2.6 veces mayor que la de plomo(II). Además la capacidad de remoción de ambos metales es fuertemente afectada por el pH ya que en el caso del cromo disminuye hasta un 32% al variar el pH de 2 a 5. De lo anterior se infiere que el cromo(VI) se une a la pared celular de la levadura en forma de anión y que la presencia de iones hidrógeno, debido al bajo pH, provee de mayor número de sitios de unión para el anión a la biomasa.

En el caso del plomo se observa un efecto inverso, la capacidad de sorción de la biomasa disminuye hasta un 50% al variar el pH de 5 a 2, lo que es indicativo de una competencia de los protones y el metal por los sitios cargados negativamente de la biomasa.

También se observa que en la mezcla binaria la biomasa mantiene su marcada preferencia para el metal Cr(VI) especialmente a pH 2 donde la capacidad de sorción resultó ser 3.4 veces mayor que la de plomo(II) mientras que a pH 5 fue 2.9 veces mayor. Lo anterior es indicativo de la afinidad de la pared celular de la biomasa estudiada por el cromo(VI).

Estos hallazgos tienen un gran valor práctico, ya que ambos metales se presentan en efluentes industriales y han sido catalogados por Volesky⁵⁴ como de alto riesgo ecológico.

En la tabla 13 se recogen los resultados de una mezcla binaria de Ni(II) y Pb(II). En ella se muestra la variación de la capacidad de sorción (q mg/g) de estos metales en mezclas tanto monometálicas como binaria.

Tabla 13.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Ni(II) y Pb(II) en disoluciones mono y bimetálicas a pH 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema Monometálico	Metal	Sistema Binario
	q (mg/g)		q (mg/g)
			pH 5
Ni pH 5	37.00	Ni	3,65
Pb pH 5	20.15	Pb	13,62

En la tabla anterior se observa que en el caso del sistema monometálico la capacidad de sorción (q mg/g) del níquel(II) es 1.5 veces mayor que la del plomo(II). En la mezcla binaria la biomasa mantiene su marcada preferencia para el metal Pb(II), donde la capacidad de sorción resultó ser 3.7 veces mayor que la de níquel(II). Los resultados difieren con los estudios realizados por Çeribasi y cols.⁹ quien reportó que la sorción de Ni(II) en *Phanaerochaete chrysosporium* fue 1.2 veces mayor que para el metal Pb(II). De lo anterior se señala que existe una competencia entre los metales por los sitios de unión, lo que es indicativo de la afinidad del plomo(II) en la mezcla binaria por la pared celular de la levadura.

En la tabla 14 se nota la variación de la capacidad de sorción de los metales Cu(II) y Zn(II) en la levadura cuando éstos se encuentran en un sistema monometálico y en un sistema binario.

Tabla 14.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Cu(II) y Zn(II) en disoluciones mono y bimetálicas a pH 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema Monometálico	Metal	Sistema Binario
	q (mg/g)		q (mg/g)
			PH 5
Cu pH 5	35,29	Cu	6,87
Zn pH 5	24.73	Zn	10,2

Se observa que la capacidad de sorción del Cu(II) en un sistema monometálico es 1.4 veces mayor que para el metal Zn(II).

De esta forma en la mezcla binaria se percibe que la levadura tiene más afinidad por el Zn(II) obteniéndose que su capacidad de sorción es 1.5 veces mayor que la del Cu(II). Esto difiere con lo realizado por Horsfall y cols.²⁸ quien obtuvo que la sorción de Zn(II) en biomasa de *Cassava waste* decrece en presencia de Cu(II). Lo anterior nos indica que en la mezcla se percibe una competencia entre estos cationes por los sitios de unión de la pared celular de la levadura teniendo preferencia por el Zn(II).

En la tabla 15 se enlistan los resultados de la variación de la capacidad de sorción de la biomasa de la levadura en un sistema monometálico como en una mezcla terciaria de cromo(VI), níquel(II) y cinc(II), a pH 2 y 5 .

Tabla 15.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Cr(VI), Ni(II) y Pb(II) en disoluciones mono y trimetálicas a pH 2 y 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema Monometálico	Metal	Sistema Terciario
	q (mg/g)		q (mg/g)
			pH 2
Cr pH 2	63,73	Cr	11,56
Cr pH 5	20,41	Ni	1,83
Ni pH 5	37	Zn	5,12
Ni pH 2	24,44		pH 5
Zn pH 5	24,73	Cr	9,86
Zn pH 2	15,12	Ni	1,96
		Zn	12,5

En esta tabla se observa en una disolución monometálica el Cr(VI) es 1.7 y 2.6 veces mayor que el Ni(II) y Zn(II) respectivamente. Además se tiene que los metales Ni(II) y Zn(II) disminuyen hasta un 66 % y 61% correspondientemente al variar el pH de 2 a 5. Mientras que en la mezcla terciaria a pH 2 la particularidad de unión es por el Cr(VI) esto coincide con investigaciones realizadas por Kratchovil y cols.³³ quien reportó que la sorción de Cr(VI) en *Sargassum sp* en forma de CrO_4^{2-} es favorable a pH bajos, en comparación con los otros dos metales.

Por lo contrario se percata que en la mezcla a pH 5 existe afinidad por el Zn(II) siendo este 1.3 y 6.4 veces mayor que el Cr(VI) y Ni(II) respectivamente.

En la tabla 16 se muestran los resultados de la variación de la capacidad de sorción de los metales cobre(II), plomo(II) y cinc(II) tanto en disolución monometálica como en un sistema terciario.

Tabla 16.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Cu(II), Pb(II) y Zn(II) en disoluciones mono y trimetálicas a pH 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema Monometálico	Metal	Sistema Terciario
	q (mg/g)		q (mg/g)
			pH 5
Cu pH 5	35,29	Cu	6,84
Cu pH 2	30,9	Pb	4,5
Pb pH 5	20.15	Zn	3,96
Zn pH 5	24.52		

Se puede notar que en la disolución monometálica la capacidad de sorción de el Cu (II) es 1.8 y 1.4 veces mayor que el Pb(II) y el Zn(II) respectivamente. De los resultados obtenidos en la tabla 16 para un sistema terciario de los metales Cu(II), Pb(II) y Zn(II) existe una competencia entre los metales Cu(II) y Pb(II) por los sitios de unión en la pared celular de la levadura teniéndose mas preferencia por el Cu(II). Esto coincide con lo reportado por Filipovic y cols.¹⁴ quienes obtuvieron que la sorción de Cu(II) en pellets de *Aspergillus Níger 405* no fue afectada por la presencia de otros metales, siendo este el que alcanzó la máxima sorción.

En la tabla 17 se perciben los resultados obtenidos de la variación de la capacidad de sorción de la biomasa de cobre (II), níquel (II) y plomo (II) en una mezcla ternaria.

Tabla 17.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Cu(II), Ni(II) y Pb(II) en disoluciones mono y trimetálicas a pH 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema Monometálico	Metal	Sistema Binario
	q (mg/g)		q (mg/g)
			pH 5
Cu pH 5	35,29	Cu	13,7
Ni pH 5	37.00	Ni	5,96
Pb pH 5	20.15	Pb	14,55

En la tabla 17 se muestra que en una disolución monometálica la capacidad de sorción de níquel(II) es 1.04 y 1.8 veces mayor que el Cu(II) y Pb(II) correspondientemente.

Los resultados obtenidos en esta mezcla concuerda con los resultados obtenidos por Marques y cols.³⁷ quienes reportaron que el Cu(II) había sido ligeramente afectado por la presencia de otros metales, en el caso de los metales Pb(II) y Cu(II) hay una ligera competencia por los sitios de unión de la pared celular de la levadura teniendo mas afinidad por el Pb(II) mientras que el metal que obtuvo menor capacidad de sorción fue el Ni(II).

En la tabla 18 se recogen los resultados de la variación de la capacidad de sorción de la biomasa de la levadura de los cinco metales estudiados en una mezcla polimetálica a pH 2 y 5.

Tabla 18.- Variación de la capacidad de sorción q (mg/g) de Cu(II), Cr(VI), Ni(II), Pb(II), Zn(II) en disoluciones mono y polimetálicas a pH 2 y 5, utilizando biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa*.

Metal	Sistema Monometálico	Metal	Sistema Polimetálico
	q (mg/g)		q (mg/g)
			pH 2
Cr pH 2	63,73	Cr	11,88
		Cu	6,18
Cu pH 5	35,29	Ni	6,44
		Pb	8,26
Ni pH 5	37,00	Zn	9,1
			pH 5
Pb pH 5	20,15	Cr	10,66
		Cu	5,04
Zn pH 5	24,52	Ni	1,66
		Pb	8,53
		Zn	8,24

En la tabla 18 se observa que en la disolución monometálica el Cr(VI) es 1,8, 1,7, 3,2 y 2,6 para Cu(II), Ni(II), Pb(II) y Zn(II) correspondientemente. De este modo en una mezcla polimetálica la biomasa mantiene su marcada preferencia para el metal Cr(VI) tanto a pH 2 como a pH 5, donde se muestra que los demás metales son afectados por la presencia de Cr(VI). Esto coincide con los resultados obtenidos por Zhao y cols.⁵⁸ quienes reportaron que la sorción de CrO_4^{2-} en *Azolla filiculoides* se sorbe mejor a pH 2 en comparación con los demás metales de interés.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES

1. Se demostró la capacidad de sorción de la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* de los metales Cr(VI), Cu(II), Ni(II), Pb(II), y Zn(II).
2. Bajo las condiciones utilizadas para la elaboración de las isotermas experimentales de adsorción, la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* mostró una marcada afinidad por el cromo(VI) presentando valores de q_{\max} de 63.73 mientras que para el resto de los metales fue de 20.15 a 37.00 mg/g.
3. Se comprobó que el proceso de biosorción con biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* es rápido, pues a los primeros minutos de contacto biomasa-metal se encuentra la mayor capacidad de sorción, mientras que la concentración de metal residual disminuye conforme el tiempo de contacto transcurre hasta conseguir el equilibrio después de 2 h de contacto.
4. La cantidad de biomasa, afecta significativamente a la capacidad de sorción lo que demuestra que el área superficial del biosorbente es crucial para la remoción de los metales.
5. La biomasa presenta saturación, debido al aumento de la concentración inicial del metal la biomasa llega al punto máximo de sorción, al seguir en contacto, la unión se vuelve insignificante formándose una monocapa.
6. Se demostró que la presencia de dos o más metales en mezclas binarias, terciarias y multimetálicas, disminuye la capacidad de sorción (q mg/g) en relación a una disolución monometálica.
7. Se determinó que la levadura *Rhodotorula mucilaginosa* es un buen biosorbente para la remoción de metales pesados, el cual se puede aplicar como tratamiento secundario y/o terciario de aguas residuales.

CAPÍTULO V

RECOMENDACIONES

Estudiar la eficiencia de la biomasa de *Rhodotorula mucilaginosa* con muestras de aguas residuales.

Experimentar con biomasa viva la remoción de metales para compararlo con los resultados obtenidos con biomasa metabólicamente inactiva.

Utilizar los resultados de esta investigación como una base para estudios de sorción con biomasa inmovilizada, la regeneración de biomasa y equilibrios en sistemas batch, los cuales serian una importante contribución para el entendimiento y aplicación de este proceso.

CAPÍTULO VI
BIBLIOGRAFÍA

1. Aldor, I., Fourest, E., Volesky, B.; **Desorption of cadmium from algal biosorbent.** *Can. J. Chem.* 1995, (73), pp 516-522.
2. Aloysius, R., Karim, M., Ariff, A.; **The mechanism of cadmium removal from aqueous solution by nonmetabolizing free and immobilized live biomass of *Rhizopus oligosporus*.** *World Journal of Microbiology & Biotechnology.* 1999, (15), pp 571-578.
3. Atkinson, B. W., Bux, F., Kasan, H.; **Considerations for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents.** *Water SA.* 1998, No. 2, Vol. 24, pp 129-135.
4. Brady D.; Stoll A.; Duncan J.R.; **Biosorption of heavy metal cations by non-viable yeast biomass.** *Environmental Technology.* 1994, 15 (5), pp 429-438.
5. Calzado, L.; Heredero, E.; **Control microbiológico de la contaminación de metales pesados y biominería.** 2000.
6. Cañizares-Villanueva, R.O.; **Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana.** *Revista Latinoamericana de Microbiología.* 2000, 42, pp 131-143.
7. Cushine, G.C.; **Electroplating wastewater pollution control technology.** *Pollution Technology Review N° 1115, Noyes Publications, Park Ridge, N.J.;* pp 96-112 y 181-197.
8. Chen, J. P. and Yiacaumi, S.; **Biosorption of metal ions from aqueous solutions.** *Sep. Sci. Technol.* 1997, 32 (1-4,) pp 51-69.
9. Çeribasi, I. and Yetis Ülkü; **Biosorption of Ni(II) and Pb(II) by *Phanerochaete chrysosporium* from a binary metal system-Kinetics.** *Water SA.* 2001, No. 1, Vol. 27 pp15-20.

10. Cho, D. H. and Yong, E.; **Characterization of lead (Pb²⁺) biosorption by *Rhodotorula glutinis*. This paper has not been reviewed for technical content. 2000. pp 1-9.**
11. Churchill, S. A., Walters, J. V. and Churchill P. F.; **Sorption of heavy metals by prepared bacterial cell surfaces. *Environ. Eng.* 1995 121 (10) pp 706-711.**
12. De Carvalho R. P., Chong, K. H., and Volesky, B.; **Evaluation of the Cd (II), Cu(II) and Zn (II) biosorption in two metal system using an algal biosorbent. *Biotechnology Progress* (1995), 11(1), pp 39-44.**
13. Engl Andrea; Kunz Benno; **Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: Effects of nutrient conditions. *Journal: Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* 1995 63 (3) pp 257-261.**
14. Filipovic-Kovacevic, Z., Sipos, L., Briski, F.; **Biosorption of Chromium, Copper Nickel and Zinc Ions onto Fungal Pellets of *Aspergillus niger* 405 from Aqueous Solutions. *Food Technol. Biotechnol.* 2000. 38 (3) pp 211-216**
15. Fourest, E. and Roux, J.C.; **Heavy metal biosorption by fungal mycelial byproducts: Mechanisms and influence of pH. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1992 (37) pp 399-403.**
16. Friis, N. and Myers-Keith, P.; **Biosorption of uranium and lead by *Streptomyces longwoodensis*. *Biotechnology and Bioengineering.* 1986 (28) pp 21-28.**
17. Gadd, G.M.; **Potencial de biorremediación del mecanismo microbiano de la movilización o inmovilización de metales. 2000.**
18. Gadd, G.M. and White, C.; **Removal of thorium from simulated acid process stream by fungal biomass. *Biotechnol. Bioeng.* 1989. Vol 33 pp 592-597.**
19. Gadd G.M.; **Biosorption. *Chemistry and Industry.* (1990,) 13, pp 421-426**

-
20. Galún, M., Galún, E., Siegel, B., Keller, P. Lehr, P., Siegel, S.; **Removal of metal ions from aqueous solutions by *Penicillium* biomass: Kinetic and uptake parameters.** *Water, Air and Soil Pollution*. 1987. Vol. 33. pp 359-371.
 21. Garnham, G. W., Codd, G. W., G. A.; **Accumulation of cobalt, zinc and manganese by the estuarine green microalgal *Chlorella salina* immobilized in alginate microbeads,** *Environ. Sci. Technol.* 1992 , 26, 1764-1769.
 22. Gomes, N., Rosa, C., Pimentel, P.; **Uptake of free and complexed silver ions by different strain of *Rhodotorula mucilaginosa*.** *Brazilian. J. Microbiol.* 2002, 33, PP 62-66.
 23. Göksungur, Yekta., Üren, S., Güvenç, U.; **Biosorption of Cu(II) ions by caustic treated waste baker's yeast biomass.** *Turk. J. Biol.* 2002. Vol 27 pp 23-29.
 24. Grupta, V.K.; **Biosorption of Chromium (VI) from aqueous solutions by green algae *Spirogyra* species.** *Water.Res* 2001 35 (17): 4079-4085.
 25. Guerrero-Cuevas, C.; López-Ramírez, L.; **Metales pesados y Medio ambiente.** 2000.
 26. Gupta, R., Ahuja, P., Khan, S., Saxena, R. K. and Mohapatra, H.; **Microbial biosorbents: Meeting challenges of heavy metal pollution in aqueous solutions.** *Current Science.* 2000, No 8, Vol. 78.
 27. Hamdy, A. A.; **Biosorption of heavy metals by marine algae.** *Curr. Microbiol.* 2000 41 (4): 232-238.
 28. Horsfall, M. Jnr., Abia, A. A. and Spiff, A. I.; **Removal of Cu(II) y Zn(II) ions from wastewater by cassava (*Manihot esculenta* Cranz) waste biomass.** *African Journal of Biotechnology.* 2003 Vol. 2(10), pp 360-364.
 29. Hu, M. Z. C., Norman, J. M., Faison, B. D., Reeves, M. E.; **Biosorption of uranium by *Pseudomonas aeruginosa* Strain CSU: Characterization and Comparison Studies.** *Biotechnol. Bioeng.* 1996 (51) pp 237-247.

30. Huang, C. P., Huang, C.P. and Morehart, A.L.; **The removal of Cu(II) from dilute aqueous solutions by *Saccharomyces cerevisiae*.** *Water Res.* 1990, 24 (4) pp 433-439.
31. Itoh, M., Yuasa, M., and Kobayashi, T.; **Adsorption of metal ions on yeast cells at varied cell concentrations.** *Plant cell Physiol.* 1975. Vol 16. pp 1167-1169.
32. Kaewrsan, P. and Yu, Q.; **Cadmium (II), removal from aqueous solutions by pre-treated biomass of marine algae *Padina* sp.** *Environmental pollution* 2001, 112 (2): 209-213.
33. Kratochvil, D., Pimentel, P., and Volesky, B.; **Removal of trivalent and hexavalent chromium by seaweed biosorbent.** *Environ. Sci. Technol.* 1998. Vol. 32, pp 2093.
34. Kurek, E., Czaban, J. and Bollag, J. M.; **Sorption of cadmium by microorganisms in competition with other soil constituents.** *Applied and Environ. Microbiology.* 1982, (43), pp 1011-1015.
35. Leusch, A., Holan, Z. R. and Volesky, B.; **Biosorption of heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) by chemically-reinforced biomass of marine algae.** *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 1995 (62) pp 279-288.
36. Loukidou, M. X., Zouboulis, A. I., Karapantsios, T. D. and Matis, K. A.; **Equilibrium and kinetic modelling of chromium(VI) biosorption by *Aeromonas caviae*.** *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 2004 pp 93-104.
37. Marques, P. A.; Pinheiro, H. M.; Teixeira, J. A.; **Eficiencia de la remoción de Cu(II), Cd(II), Pb(II) por biomasa crevesera de desecho: efectos del pH y la asociación del catión.** *Desalination.* 1999 124 (3) p137-144.
38. Medrano Roldan, Galán Wong, Luis; **Bioteconología de Minerales.** *Docuimagen S.A. de C.V.* 2000 pp 235-259.
39. Modak, J. M.; and Natarajan, K. A. **Biosorption of metals using nonliving biomass.** *Minerals and Metalurgical Processing* 1995 12 (4) pp 189-196.

-
40. Mullen, M. D., Wolf, D. C., Ferris, F. G., Beveridge, T. J. and Bailey, G. W.; **Bacterial sorption of heavy metals.** *Applied and Environmental Microbiology.* 1989 (55) pp 3143-3149.
41. Omar N. B.; Merroun M. L.; Gonzalez-Munoz M. T.; Arias Jose M.; **Brewery yeast as a biosorbent for uranium.** *Journal: Journal of Applied Bacteriology.* 1996 81 (3): pp 283-287.
42. Paknikar, K.M., Palnitkar, U. S. and Puranik, P. R.; **Biosorption of metals from solution by micelial waste of *Penicillium chrysogenum*.** *Biohydrometallurgical Technologies.* Ed by A. E. Torma, M.L. Apel and C.L. Brierlay, *The Mineral, Metals and Materials Society* 1993 pp 229-235.
43. Pearson, R. G.; **Hard and soft acids and bases.** *Surv. Prog. Chem.,* 1969, 5 (1).
44. Petrasek, A.C. Wastewater characterization and process reliability for potable wastewater reclamation. U.S. EPA Rep. No. EPA- 600/2-77,210, *Munic. Environ. Res. Lab., Cincinnati, Ohio* (1977).
45. Pons, M.P. and Fouste, M.C.; **Uranium uptake by immobilized cells of *Pseudomonas* strain EPS 5028.** *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1993. Vol 39 pp 661-665.
46. Puranik P. R. and Paknikar K.M.; **Biosorption of Lead, Cadmium and Zinc by *Citrobacter* Strain MCM B-181: Characterization Studies.** *Biotechnol. Prog.* 1999. 15 (2), pp 228-237.
47. Ruíz-Manríquez, A., Magaña, P.I., López, V. y Guzmán, R.; **Biosorption of Cu by *Thiobacillus ferrooxidans*.** *Bioprocess Engineering.* 1998 Vol 2 pp 18.
48. Salinas, E.; Elorza de Orellano, M.; Rezza, I.; **Removal of cadmium and lead from dilute aqueous solutions by *Rhodotorula rubra*.** *Bioresource Technology.* 2000 72 pp 107-112.

49. Sarishvili, N. G., Panasyuk A. L., Stolyarova, E. N., Gulevskaya, S. A., Koshchenko, K. A.; **Biosorption of heavy metals by the *Saccharomyces vini* yeast.** *Journal: Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya.* 1992. 28 (3) pp 402-408.
50. Townsley, C.C. and Ross, I. S.; **Copper uptake in *Aspergillus niger* during batch, growth and in non growing mycelial suspensions.** *Experimental mycology* 1986 10: 281-288
51. Tsezos, M. and Volesky, B.; **Biosorption of uranium and thorium.** *Biotechnology and Bioengineering.* 1981 (23) pp 583-604.
52. Volesky B. A.; May-Phillips H. A.; **Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*.** *Journal: Applied Microbiology and Biotechnology.* 1995 42 (5) pp 797-806.
53. Volesky ,B. and Holan, Z. R.; **Biosorption of heavy metals.** *Biotechnol. Prog.*1995, 11 (3) pp 235-250.
54. Volesky, B.; **Biosorption for the next century.** Chemical Engineering Department. Mc Gill University, Canadá (1999).
55. Wase, J., Forster, C.; **Biosorbents for metal ions,** Taylor & Francis Publishers, Gran Bretaña, (1997)
56. Yan, Guangyu and Viraraghavan, T.; **Effect of pre-treatment on the bioadsorption of heavy metals on *Mucor rouxii*.** *Water SA.* 2000 No. 1, Vol. 26 pp 119-123.
57. Zhang, X., Huang, K., Xiang, Z., Wang, E., Li, F.; **Biosorption sites of copper ion by *Candida utilis* cell and cell wall.** *Chinese J. of Applied & Environ. Biology.* 2000. Vol. 6. No. 1. pp 93-95.
58. Zhao, M., Duncan, J. R. y Van Hille, R. P.; **Removal and recovery of zinc from solution and electroplating effluent by *Azolla filiculoides*.** *Water Res.* 1999, 33 (6), pp 1516-1522.

-
59. Zhou J.L. y Kiff R.J. **Identify apropiate water reclamation technologies**. Chem Eng. Progr. May: 19-31 (1991).
60. *Revista Consumer Octubre 2001*
<http://revista.consumer.es/web/es/20010301/medioambiente/27009.jsp>
61. *Sanmiguel F; Hernández MC, Luján-Galván VA. Exposición a Metales en la Ciudad de Torreón Coahuila*
<http://www.salud.gob.mx/unidades/dirsca/downloads/saludinf/Cap05.pdf>
62. *Lenntech Agua residual & air purification Holding B.V*
<http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Ni.htm>
63. *Osasuna Flores Israel, Aguirre García Feliciano; Lunes en la Ciencia. Cobre, Amigo y Adversario de la salud Humana, Diciembre 2001*
<http://www.jornada.unam.mx/2001/dic01/011231/cien-cobre.html>
64. *Filartiga Joel, Agüero Wagner Luis; Apocalipsis Geo-Ambiental, El Imperialismo Ecológico, Apartado Basura Toxica*
<http://www.quanta.net.py/userweb/apocalipsis/index.html>
65. *Rhodotorula spp (Described by Harrison in 1927)*
<http://www.doctorfungus.org/thefungi/Rhodotorula.htm>
66. *Peña Cano Jesús Educaplus.org; Tabla Periódica 2003*
<http://www.educaplus.org/index.html>
67. *Plomo* <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Plomo.htm>
68. *Las aguas en America : el caso de México*
http://www.eurosur.org/medio_ambiente/bif74.htm
69. http://www.tdx.cesca.es-TESES_UPC-AVAILABLE-TDX-0619102-193943-04CAPITULÓL2.pdf.url.
70. *Canal de la Salud, Medicina, Nutrición, Salud y Belleza*
<http://salud.tiscali.es/informacion/10263/zinc.html>
-

APÉNDICE DE TABLAS

Tabla I.- Resultados de la sorción de Cobre (II) a pH 2 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Cu	49,59	5 min	47,01	45,47	46,78	46,42	0,83	3,17
		20 min	45,87	45,62	45,91	45,80	0,16	3,79
		120 min	41,15	39,86	40,41	40,47	0,65	9,12
	120,20	5 min	114,60	112,91	113,50	113,66	0,86	6,54
		20 min	111,75	112,30	110,87	111,64	0,72	8,56
		120 min	101,46	102,03	103,07	102,18	0,82	18,02
	240,08	5 min	230,47	229,81	228,72	229,67	0,88	10,41
		20 min	225,90	224,40	225,54	225,28	0,78	14,80
		120 min	211,79	210,04	210,68	210,84	0,89	29,24
	480,07	5 min	470,20	471,70	470,80	470,90	0,75	9,17
		20 min	458,20	459,77	457,97	458,65	0,98	21,42
		120 min	448,50	449,00	450,00	449,167	0,76	30,90

Tabla II.- Resultados de la sorción de Cobre (II) a pH 5 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Conc. Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Cu	49,59	5 min	47,01	45,47	46,78	46,42	0,83	3,17
		20 min	45,87	45,62	45,91	45,80	0,16	3,76
		120 min	41,15	39,86	40,41	40,47	0,65	9,12
	121,82	5 min	114,94	116,09	115,82	115,62	0,60	6,20
		20 min	112,26	110,75	110,92	111,31	0,82	10,51
		120 min	103,120	102,93	101,32	102,45	0,99	19,37
	237,32	5 min	227,90	225,95	226,90	226,92	0,98	10,40
		20 min	221,89	219,95	220,80	220,88	0,97	16,44
		120 min	206,96	204,97	205,99	205,97	0,99	31,35
	475,70	5 min	460,38	458,93	460,60	459,97	0,91	15,73
		20 min	450,95	448,98	449,93	449,95	0,99	25,75
		120 min	440,17	439,43	440,62	440,07	0,60	35,63

Tabla III.- Resultados de la sorción de Cobre (II) a pH 7 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Conc. Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Cu	49,59	5 min	47,01	45,47	46,78	46,42	0,83	3,17
		20 min	45,87	45,62	45,91	45,80	0,16	3,79
		120 min	41,15	39,86	40,41	40,47	0,65	9,12
	119,65	5 min	115,54	114,16	113,93	114,54	0,87	5,11
		20 min	113,74	112,97	111,99	112,90	0,88	6,75
		120 min	109,92	110,04	111,46	110,47	0,86	9,18
	239,18	5 min	233,03	231,99	231,12	232,05	0,96	7,14
		20 min	230,02	230,65	229,04	229,90	0,81	9,28
		120 min	229,01	228,15	229,04	228,73	0,51	10,45
	478,16	5 min	468,04	467,53	467,66	467,74	0,27	10,42
		20 min	465,08	464,62	464,48	464,73	0,31	13,43
		120 min	460,37	459,87	460,70	460,31	0,42	17,85

Tabla IV.- Resultados de la sorción de Cromo (VI) a pH 2 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estándar	q(mg/g)
Cr	54.08	5 min	46.74	45.32	45.99	46.02	0.71	8.07
		20 min	44.25	43.97	44.97	44.39	0.51	9.69
		120 min	40.93	40.12	39.99	40.34	0.51	13.74
	119.98	5 min	105.40	103.64	105.26	104.76	0.98	15.22
		20 min	93.098	93.32	92.85	93.09	0.23	26.89
		120 min	84.34	86.17	85.18	85.22	0.91	34.76
	240.05	5 min	219.40	219.90	220.95	220.08	0.79	19.967
		20 min	204.00	202.68	203.58	203.42	0.67	36.63
		120 min	194.38	193.74	194.46	194.19	0.39	45.86
479.83	5 min	453.89	452.51	452.94	453.11	0.71	26.72	
	20 min	432.82	432.35	433.37	432.85	0.51	46.99	
	120 min	415.65	416.66	417.01	416.44	0.71	63.40	

Tabla V.- Resultados de la sorción de Cromo (vD) a pH 5 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estándar	q(mg/g)
Cr	51.93	5 min	47.36	47.57	47.68	47.54	0.17	4.39
		20 min	44.69	44.85	44.99	44.84	0.15	7.09
		120 min	40.14	40.43	40.61	40.39	0.24	11.53
	119.99	5 min	113.32	112.33	111.68	112.44	0.82	7.55
		20 min	107.33	109.31	108.26	108.30	0.99	11.69
		120 min	103.76	102.50	103.62	103.29	0.69	16.70
	240.04	5 min	223.13	223.06	222.62	222.94	0.28	17.10
		20 min	222.62	221.5	221.49	221.88	0.64	18.16
		120 min	219.72	220.16	220.70	220.19	0.49	19.84
	479.95	5 min	461.42	462.09	462.90	462.14	0.74	17.82
		20 min	460.86	461.36	460.73	460.98	0.34	18.97
		120 min	459.98	458.74	459.90	459.54	0.69	20.41

Tabla VI.- Resultados de la sorción de Cromo (II) a pH 7 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estándar	q(mg/g)
Cr	54,72	5 min	50,79	50,89	49,90	50,53	0,54	4,20
		20 min	49,93	49,95	49,81	49,90	0,08	4,83
		120 min	48,74	48,93	48,65	48,77	0,14	5,95
	119,91	5 min	115,44	116,54	114,70	115,56	0,93	4,36
		20 min	110,09	111,30	110,41	110,60	0,62	9,31
		120 min	110,43	110,11	109,30	109,94	0,58	9,97
	240,03	5 min	234,69	233,12	233,28	233,69	0,87	6,34
		20 min	225,07	224,74	224,65	224,82	0,22	15,21
		120 min	223,65	222,54	222,68	222,96	0,61	17,08
	479,92	5 min	469,24	467,84	468,19	468,42	0,72	11,50
		20 min	462,03	462,62	461,41	462,02	0,61	17,90
		120 min	460,21	460,09	459,85	460,05	0,18	19,87

Tabla VII.- Resultados de la sorción de Níquel (II) a pH 2 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	Conc. Sorbida
Ni	50.82	5 min	47.72	47.04	48.16	47.64	0.56	3.18
		20 min	47.00	46.99	46.78	46.92	0.12	3.90
		120 min	45.85	46.10	45.92	45.96	0.13	4.86
	119.95	5 min	112.42	111.77	113.42	112.53	0.83	7.41
		20 min	109.29	109.76	110.75	109.93	0.75	10.02
		120 min	106.64	106.55	107.00	106.73	0.24	13.22
	239.92	5 min	233.11	232.68	231.22	232.34	0.99	7.58
		20 min	225.84	226.31	224.67	225.61	0.84	14.31
		120 min	217.35	218.49	217.99	217.94	0.57	21.98
480.04	5 min	463.08	462.20	464.04	463.10	0.92	16.94	
	20 min	459.89	460.05	458.97	459.64	0.58	20.40	
	120 min	456.43	455.11	455.24	455.59	0.73	24.45	

Tabla VIII.- Resultados de la sorción de Níquel (II) a pH 5 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	Conc. Sorbida
Ni	47,59	5 min	43,34	45,04	44,72	44,36	0,91	3,22
		20 min	42,433	42,87	41,92	42,40	0,47	5,18
		120 min	40,35	39,94	38,88	39,72	0,76	7,87
	119,99	5 min	110,97	112,28	111,50	111,58	0,66	8,41
		20 min	106,99	108,55	107,72	107,75	0,78	12,24
		120 min	101,10	102,45	101,38	101,64	0,71	18,35
	239,93	5 min	226,38	225,55	227,01	226,31	0,73	13,62
		20 min	218,77	218,83	217,89	218,50	0,53	21,43
		120 min	214,81	214,49	213,99	214,43	0,41	25,50
	479,94	5 min	454,01	453,65	453,32	453,66	0,35	26,28
		20 min	449,43	448,24	448,2	448,62	0,70	31,32
		120 min	443,54	443,35	442,04	442,98	0,82	36,96

Tabla IX.- Resultados de la sorción de Níquel (II) a pH 7 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	Conc. Sorbida
Ni	50,57	5 min	48,55	48,71	48,32	48,53	0,19	2,04
		20 min	45,53	44,85	44,92	45,10	0,37	5,47
		120 min	43,26	43,957	42,89	43,37	0,54	7,20
	119,97	5 min	117,88	116,66	116,37	116,97	0,80	3,00
		20 min	109,87	109,05	108,18	109,03	0,84	10,94
		120 min	108,00	108,96	107,60	108,19	0,70	11,78
	240,01	5 min	228,27	228,39	228,79	228,48	0,27	11,53
		20 min	225,41	224,92	224,39	224,91	0,51	15,10
		120 min	215,28	215,96	214,30	215,18	0,83	24,83
	480,01	5 min	465,81	464,65	464,96	465,14	0,60	14,87
		20 min	456,40	455,72	454,98	455,70	0,71	24,31
		120 min	450,75	449,52	448,97	449,75	0,91	30,26

Tabla X.- Resultados de la sorción de Plomo (II) a pH 2 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Pb	50,04	5 min	47,35	47,19	47,52	47,35	0,17	2,68
		20 min	47,77	46,815	45,95	46,84	0,91	3,19
		120 min	45,70	45,30	43,90	44,96	0,95	5,07
	120,15	5 min	115,74	115,99	116,31	116,01	0,29	4,14
		20 min	115,40	114,92	115,38	115,23	0,27	4,91
		120 min	114,20	113,93	114,30	114,14	0,19	6,00
	239,95	5 min	233,65	233,60	233,90	233,71	0,16	6,24
		20 min	232,54	232,78	232,99	232,77	0,23	7,18
		120 min	230,91	231,45	230,72	231,02	0,38	8,93
	479,94	5 min	470,95	470,23	470,60	470,59	0,36	9,34
		20 min	469,81	469,75	469,55	469,70	0,13	10,23
		120 min	467,50	467,73	467,10	467,44	0,32	12,49

Tabla XI.- Resultados de la sorción de Plomo (II) a pH 5 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Pb	49,97	5 min	47,30	47,25	47,12	47,22	0,09	2,75
		20 min	45,30	45,70	45,00	45,33	0,35	4,64
		120 min	40,147	41,43	40,47	40,68	0,67	9,30
	120,19	5 min	115,32	116,07	115,25	115,55	0,45	4,65
		20 min	113,70	114,25	114,00	113,98	0,28	6,21
		120 min	110,27	109,65	109,99	109,97	0,31	10,23
	240,01	5 min	233,38	232,90	233,01	233,10	0,25	6,91
		20 min	230,10	229,90	230,15	230,05	0,13	9,96
		120 min	226,63	227,25	226,57	226,81	0,38	13,20
	480,07	5 min	469,72	469,82	470,11	469,88	0,20	10,19
		20 min	467,64	467,99	468,27	467,97	0,32	12,10
		120 min	459,94	460,17	459,65	459,92	0,26	20,15

Tabla XII.- Resultados de la sorción de Plomo (II) a pH 7 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q (mg/g)
Pb	49.99	5 min	47,05	47,42	46,91	47,12	0,26	2,87
		20 min	46,50	46,30	45,70	46,14	0,42	3,83
		120 min	45,90	45,72	45,60	45,74	0,15	4,26
	120.00	5 min	116,69	116,50	116,26	116,48	0,21	3,52
		20 min	116,27	116,06	115,54	115,96	0,38	4,04
		120 min	115,26	114,84	114,63	114,91	0,32	5,09
	239,90	5 min	235,43	235,32	235,40	235,38	0,06	4,52
		20 min	235,12	235,08	234,60	234,93	0,29	4,97
		120 min	234,11	233,65	233,51	233,75	0,31	6,15
	479,60	5 min	474,00	473,92	473,81	473,91	0,10	5,69
		20 min	473,50	473,20	472,50	473,07	0,51	6,53
		120 min	471,30	470,60	469,99	470,63	0,65	8,97

Tabla XIII.- Resultados de la sorción de Zinc (II) a pH 2 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Zn	50,50	5 min	47,80	48,85	46,95	47,86	0,95	2,64
		20 min	47,90	47,10	47,45	47,48	0,40	3,02
		120 min	46,90	47,05	47,00	46,98	0,08	3,52
	121,20	5 min	118,60	117,42	117,25	117,76	0,74	3,44
		20 min	117,00	116,20	116,00	116,40	0,53	4,80
		120 min	116,00	115,70	115,50	115,73	0,25	5,47
	240,00	5 min	235,50	236,82	234,88	235,73	0,99	4,27
		20 min	230,16	229,52	228,32	229,33	0,93	10,67
		120 min	227,29	226,51	226,62	226,81	0,42	13,19
480,00	5 min	474,78	472,85	473,89	473,84	0,97	6,16	
	20 min	468,36	467,85	466,50	467,57	0,96	12,43	
	120 min	465,67	464,88	464,09	464,88	0,79	15,12	

Tabla XIV.- Resultados de la sorción de Zinc (II) a pH 5 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1 er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Zn	49,25	5 min	47,50	48,00	47,65	47,72	0,26	1,53
		20 min	47,30	47,08	46,95	47,11	0,18	2,14
		120 min	42,70	43,70	42,90	43,10	0,53	6,15
	118,80	5 min	117,20	116,50	116,45	116,72	0,42	2,08
		20 min	114,40	115,00	114,90	114,77	0,32	4,03
		120 min	110,70	111,30	110,50	110,83	0,42	7,97
	240,00	5 min	235,50	236,82	234,88	235,73	0,99	4,27
		20 min	231,53	231,09	231,20	231,27	0,23	8,73
		120 min	225,70	225,65	225,32	225,56	0,21	14,44
	479,99	5 min	472,98	472,63	474,45	473,35	0,97	6,64
		20 min	468,36	469,48	469,13	471,28	0,57	8,71
		120 min	455,12	455,45	455,2	455,26	0,17	24,73

Tabla XV.- Resultados de la sorción de Zinc (II) a pH 7 utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

Metal	Concentración Inicial	Tiempo	1er exp.	2do exp.	3er exp.	Media	Desv. Estandar	q(mg/g)
Zn	49,85	5 min	48,50	48,45	47,95	48,30	0,30	1,55
		20 min	46,00	46,50	45,50	45,99	0,5	3,85
		120 min	45,50	44,50	44,15	44,71	0,70	5,14
	119,99	5 min	116,15	117,06	117,98	117,06	0,92	2,93
		20 min	111,26	112,1	111,62	111,66	0,42	8,33
		120 min	110,31	109,13	109,19	109,54	0,66	10,45
	239,99	5 min	235,71	234,17	234,85	234,91	0,77	5,08
		20 min	231,59	233,34	232,45	232,46	0,88	7,53
		120 min	228,29	227,51	226,62	227,47	0,84	12,52
	479,99	5 min	474,45	472,58	473,73	473,59	0,94	6,40
		20 min	468,02	468,87	469,09	468,66	0,57	11,33
		120 min	459,61	460,23	460,321	460,05	0,39	19,94

Tabla XVI.- Influencia de la concentración de biomasa sobre la capacidad de sorción de Cu(II) utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

		Concentración Inicial = 53.089				Cobre(II)		
Concentración de biomasa (gL ⁻¹)	Concentración residual (ppm)	Concentración residual media	Concentración sorbida (ppm)	Capacidad de sorción q(mg/g)	% Metal sorbido	%Metal residual		
2.5	36.07	35.50	17.59	70.34	33.13	66.87		
	35.15							
	35.29							
5	34.11	34.28	19.23	33.45	36.22	63.78		
	33.96							
	34.77							
10	29.55	30.29	22.80	22.80	42.93	57.07		
	30.62							
	30.42							
20	28.74	27.87	25.22	12.61	47.51	52.49		
	27.49							
	27.37							
30	23.85	21.48	31.61	10.53	59.54	40.46		
	20.44							
	20.20							

Tabla XVII.- Influencia de la concentración de biomasa sobre la capacidad de sorción de Cr(VI) utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

		Concentración Inicial = 51.070					Cromo(VI)	
Concentración de biomasa (mg)	Concentración residual (ppm)	Concentración residual media	Concentración sorbida (ppm)	Capacidad de sorción q (mg/g)	% Metal sorbido	% Metal residual		
2.5	42.33	43.29	7.78	31.14	15.24	84.76		
	43.38							
	43.14							
5	41.48	41.44	9.64	19.27	18.87	81.13		
	42.33							
	40.50							
10	41.03	40.69	10.39	10.39	20.33	79.67		
	42.32							
	38.70							
20	37.96	38.00	13.07	6.54	25.59	74.41		
	38.39							
	37.65							
30	36.80	36.80	14.27	4.76	27.95	72.05		
	36.77							
	36.83							

Tabla XVIII.- Influencia de la concentración de biomasa sobre la capacidad de sorción de Ni(II) utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

		Concentración Inicial = 55.393				Niquel(II)		
Concentración de biomasa (mg)	Concentración residual (ppm)	Concentración residual media	Concentración sorbida (ppm)	Capacidad de sorción q (mg/g)	% Metal sorbido	% Metal residual		
2.5	52.43	51.02	3.89	15.56	7.02	92.98		
	50.65							
	51.42							
5	48.97	49.01	6.38	12.76	11.52	88.48		
	49.04							
	49.03							
10	50.15	49.01	6.40	6.14	11.54	88.46		
	49.08							
	48.54							
20	51.32	48.48	6.91	3.47	12.48	87.52		
	47.97							
	46.15							
30	46.44	46.47	8.92	2.97	16.11	83.89		
	46.07							
	46.90							

Tabla XIX.- Influencia de la concentración de biomasa sobre la capacidad de sorción de Pb(II) utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

		Concentración Inicial = 47.740					Plomo(II)		
Concentración de biomasa (mg)	Concentración residual (ppm)	Concentración residual media	Concentración sorbida (ppm)	Capacidad de sorción q(mg/g)	% Metal sorbido	%Metal residual			
2.5	41.61	41.61	6.13	24.52	12.84	87.16			
	40.89								
	42.35								
5	41.59	41.53	6.20	12.40	12.99	87.01			
	41.00								
	42.10								
10	40.93	41.17	6.57	6.57	13.76	86.24			
	41.50								
	41.09								
20	38.09	40.01	7.723	3.86	16.17	83.83			
	40.93								
	41.03								
30	40.00	39.29	8.45	2.82	17.70	82.30			
	41.00								
	36.86								

Tabla XX.- Influencia de la concentración de biomasa sobre la capacidad de sorción de Zn(II) utilizando biomasa de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

		Concentración Inicial = 46.150					Zinc(II)	
Concentración de biomasa (mg)	Concentración residual (ppm)	Concentración residual media	Concentración sorbida (ppm)	Capacidad de sorción q(mg/g)	% Metal sorbido	%Metal residual		
2.5	37.85	39.12	7.03	28.12	15.23	84.77		
	38.82							
	40.65							
5	38.60	38.28	7.81	15.74	17.07	82.93		
	38.20							
	38.05							
10	38.85	37.63	8.52	8.52	18.46	81.54		
	38.70							
	35.35							
20	36.15	36.95	9.20	4.60	19.93	80.07		
	34.85							
	38.85							
30	36.25	36.25	9.90	3.30	21.47	78.53		
	34.75							
	37.65							

APÉNDICE DE FIGURAS

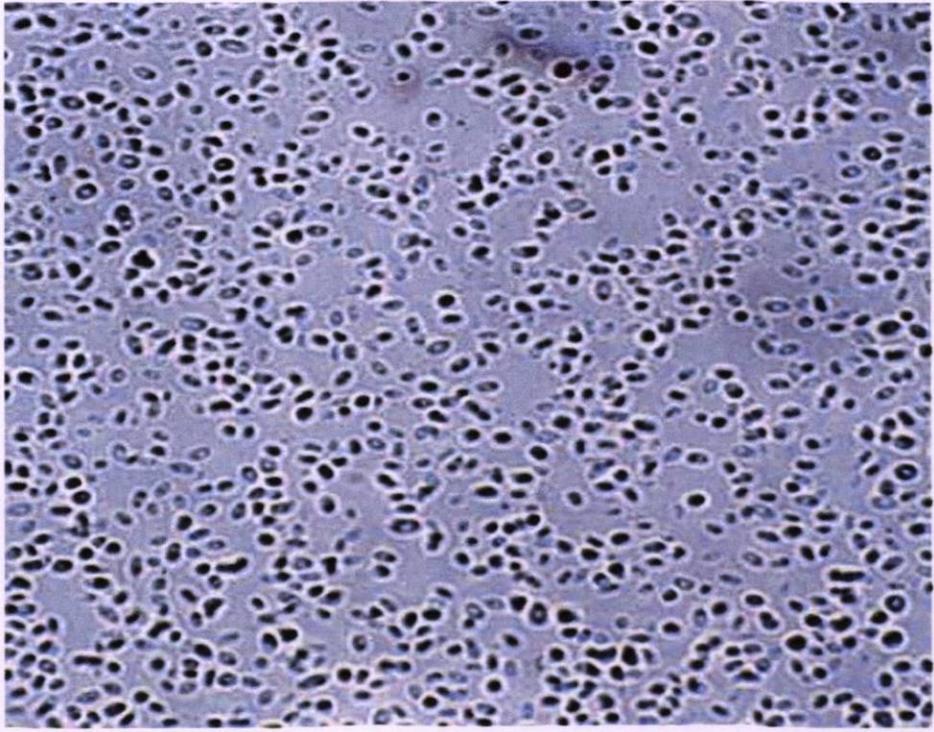


Figura 1.- Observación microscópica de la levadura *Rhodotorula mucilaginosa*

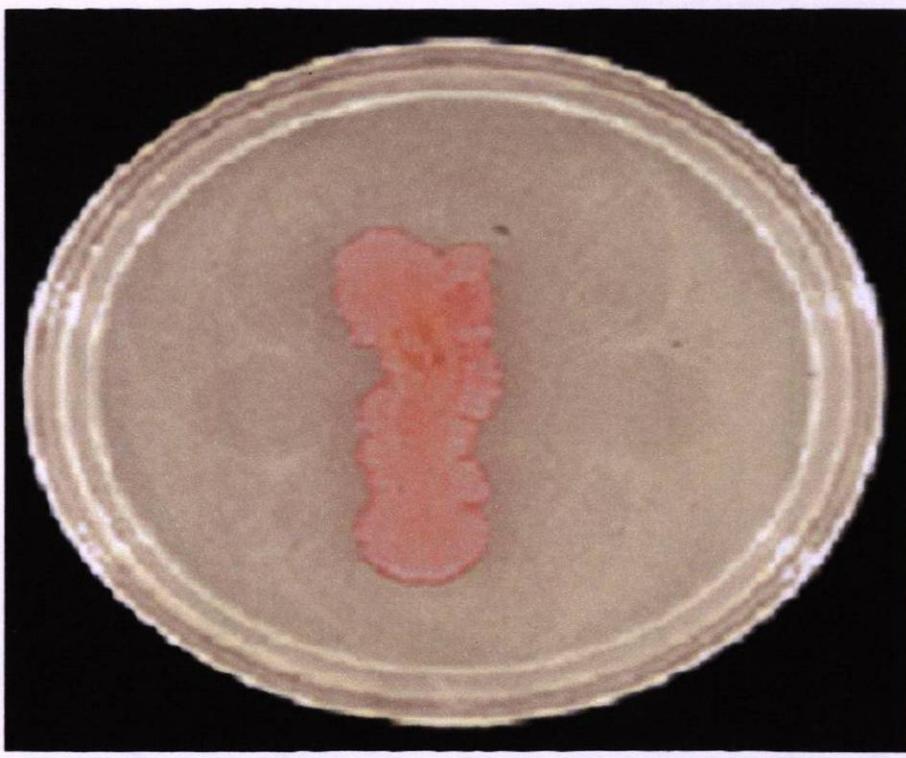


Figura 2.- Observación macroscópica de *Rhodotorula mucilaginosa*.

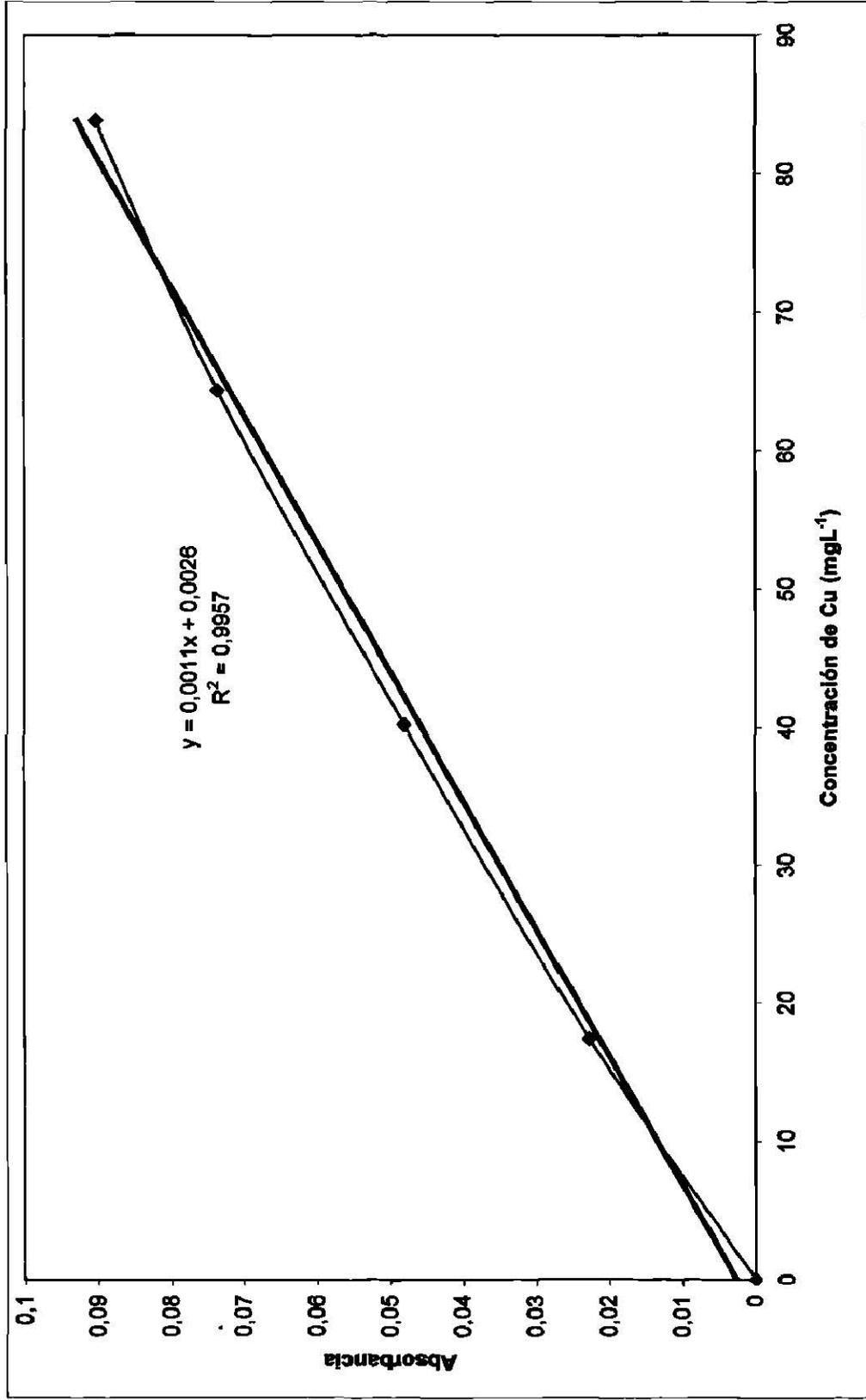


Figura 3.- Curva de calibración para el metal Cu(II)

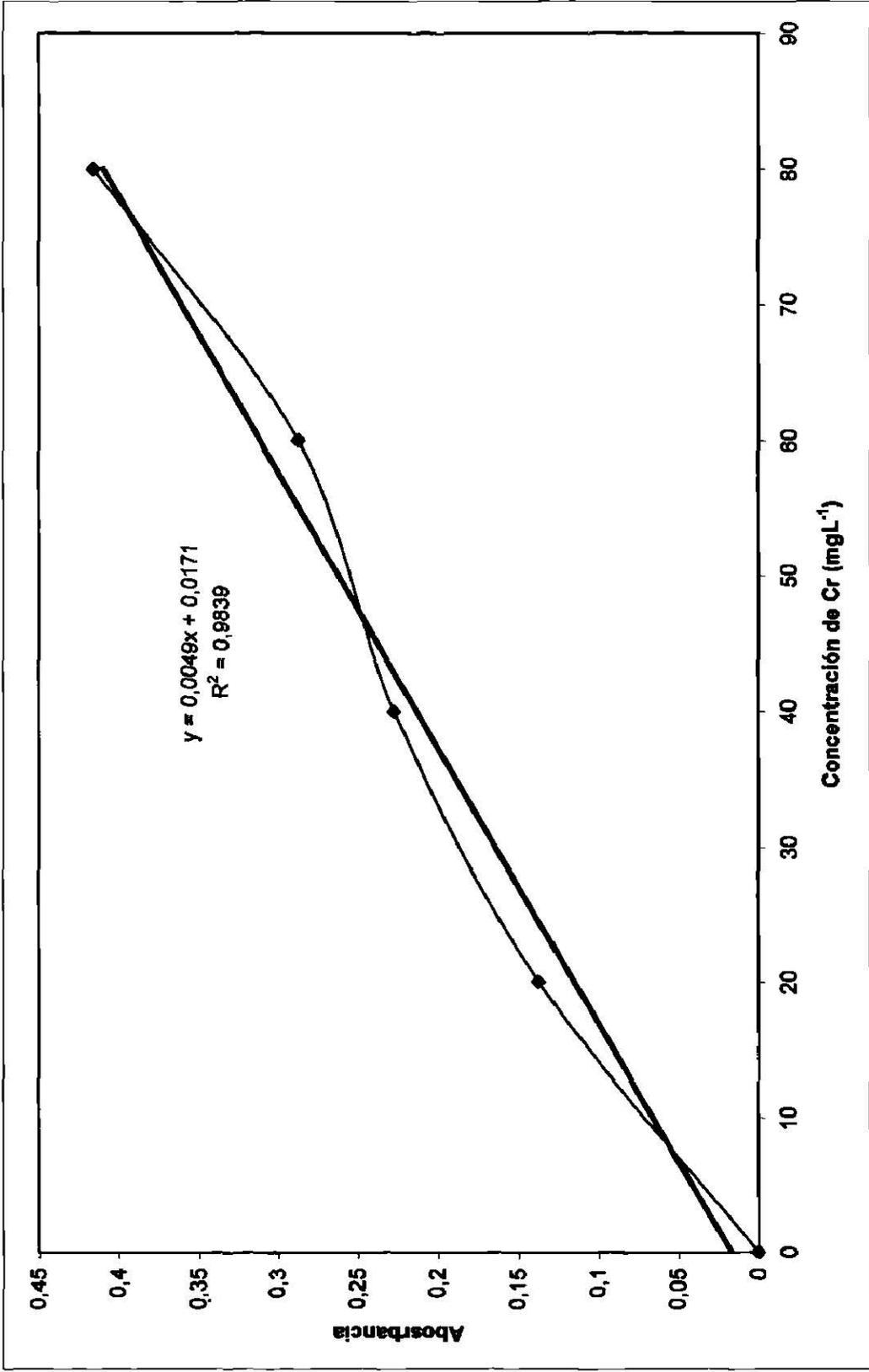


Figura 4.- Curva de calibración para el metal Cr (VI)

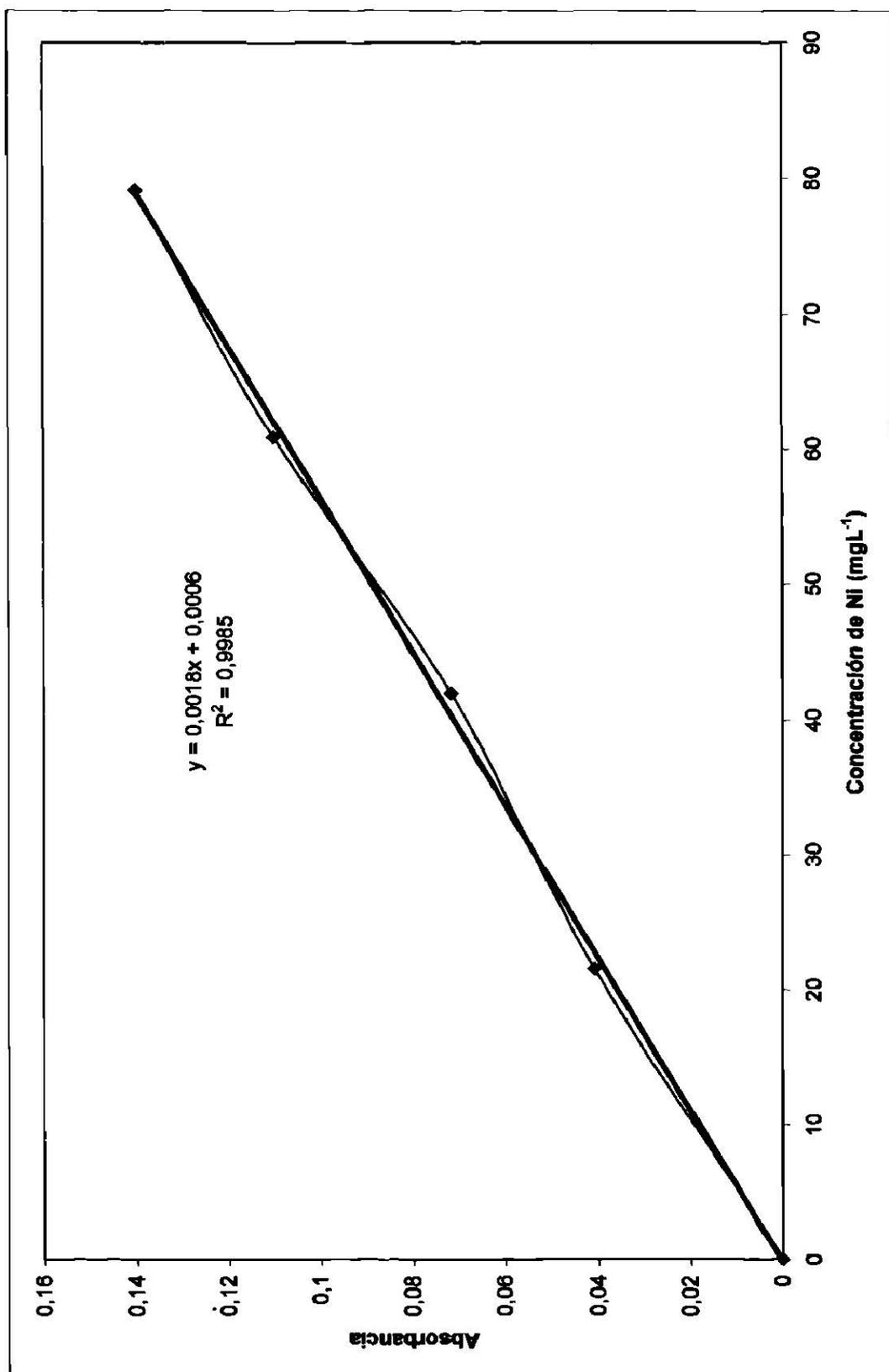


Figura 5.- Curva de calibración del metal Ni (II)

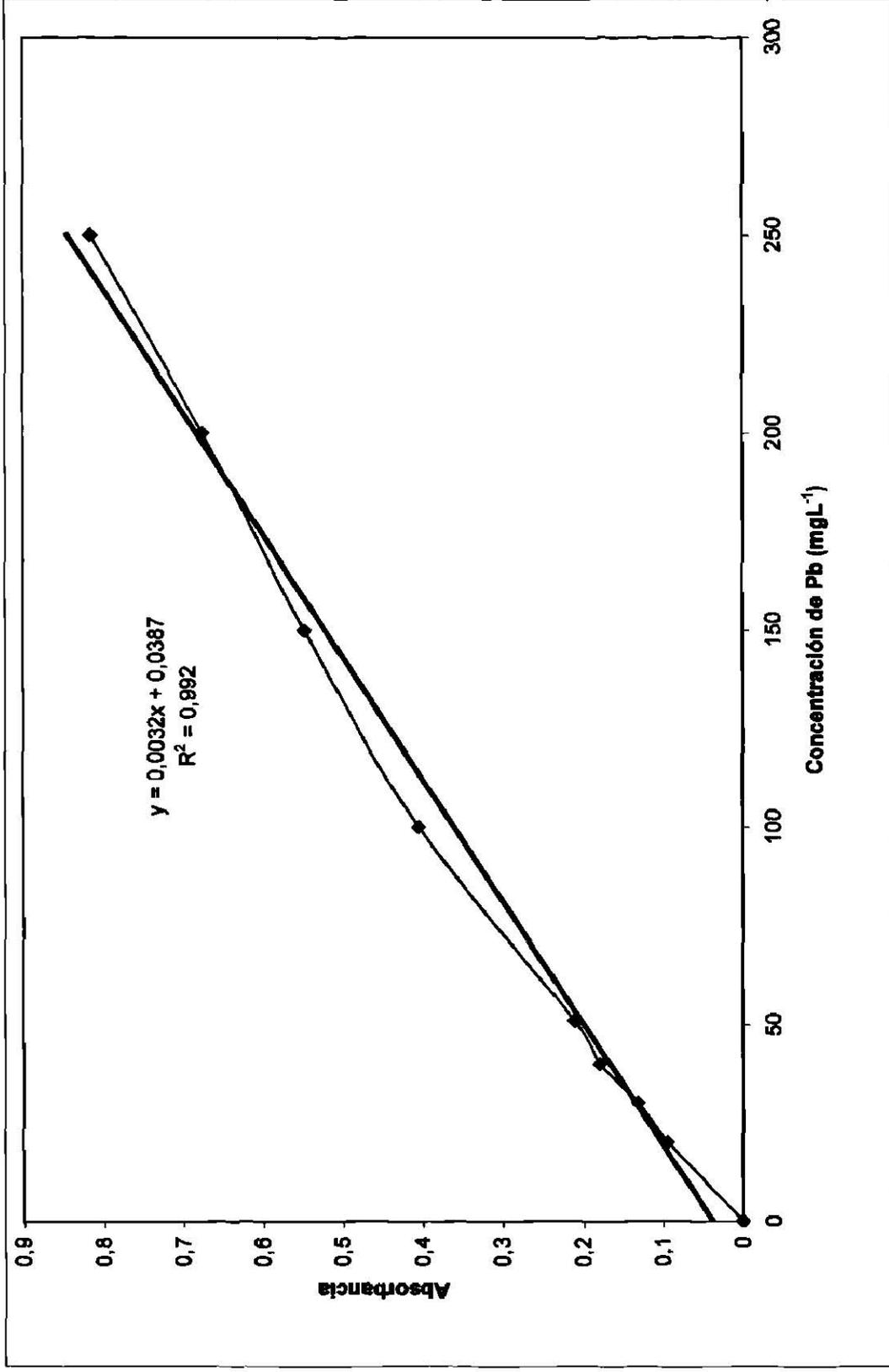


Figura 6.- Curva de calibración del metal Pb (II)

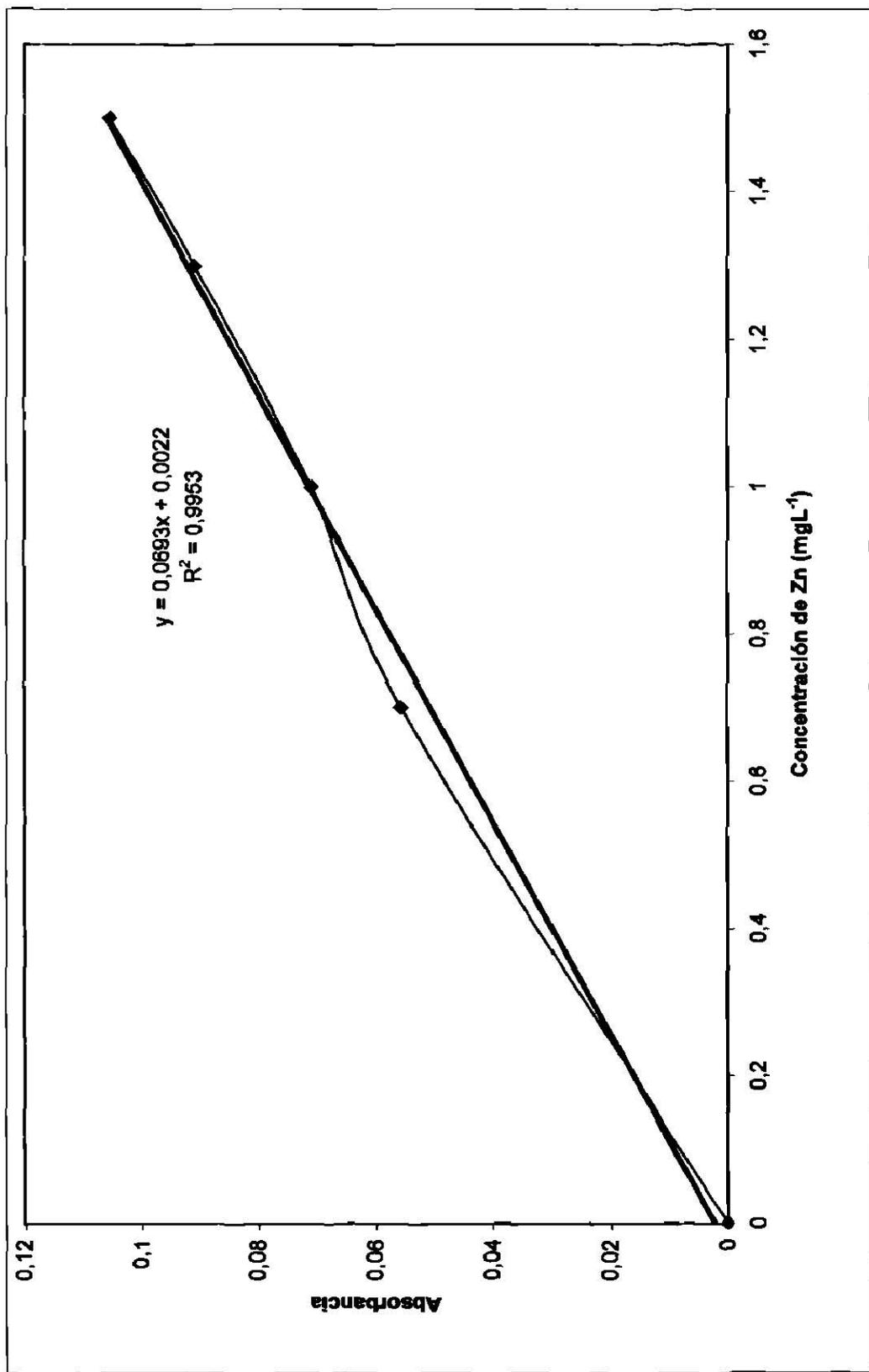


Figura 7.- Curva de calibración para el metal Zinc (II)

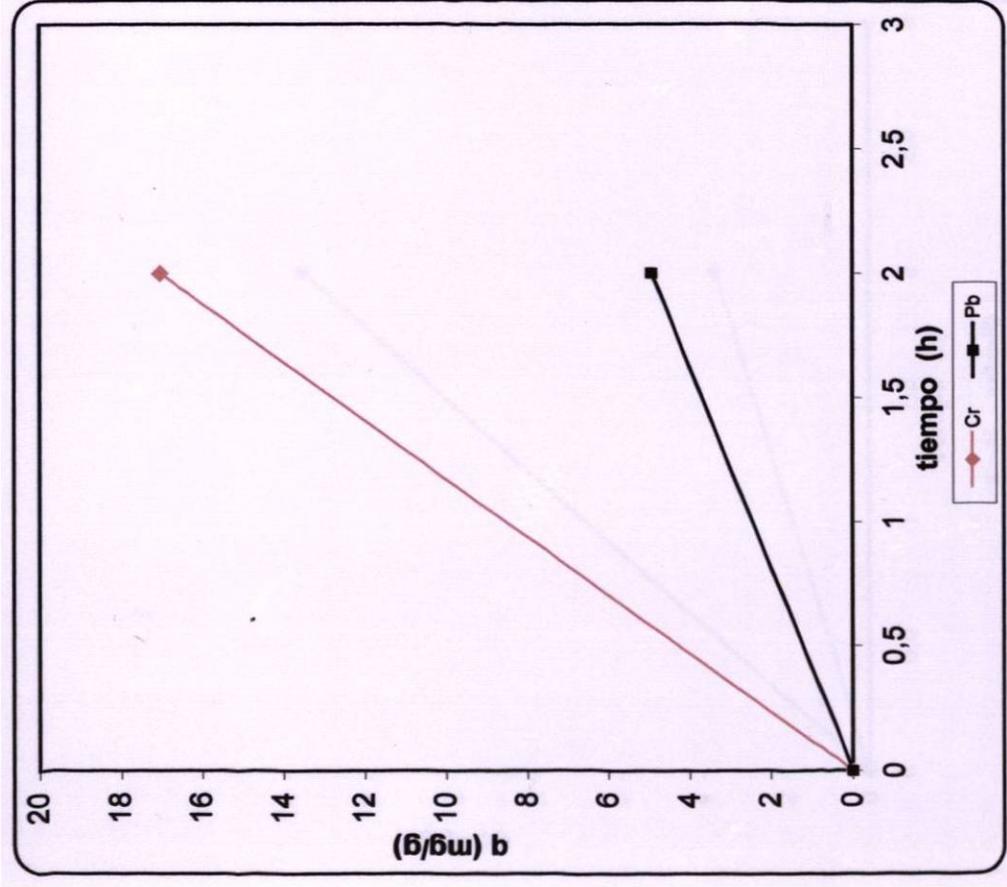


Figura 8.- Valoración de la capacidad sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla binaria de Cr(VI) y Pb(II) a pH 2.

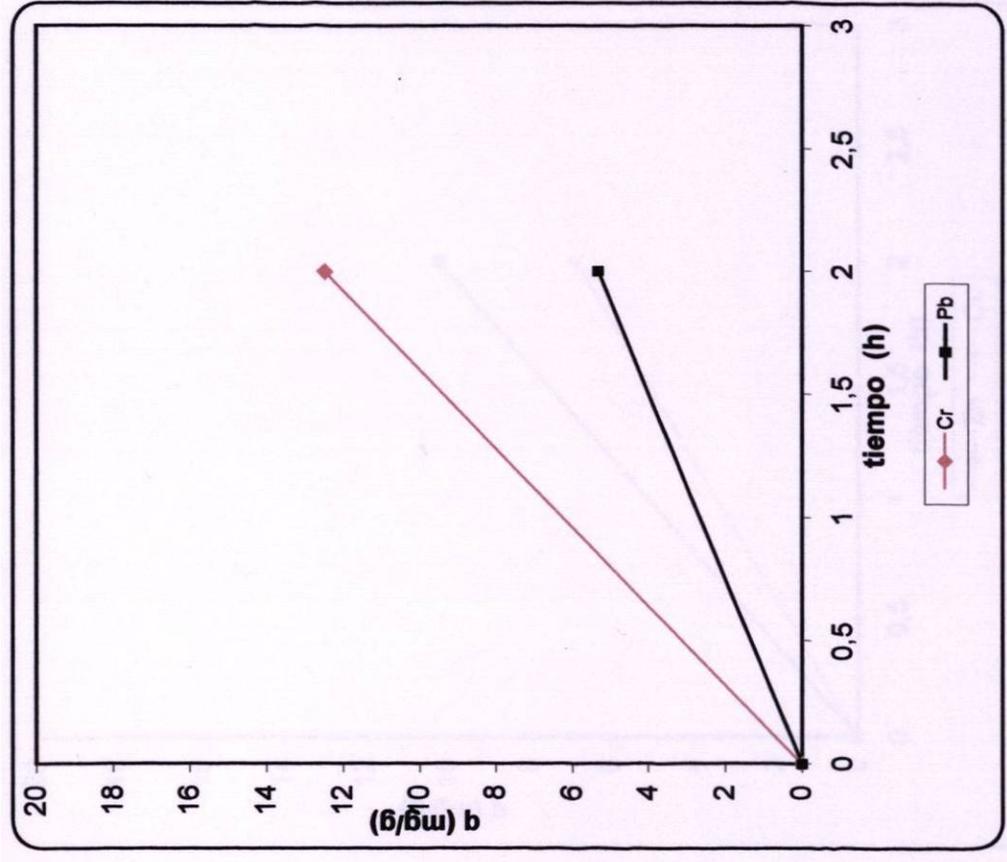


Figura 9.- Valoración de la capacidad sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla binaria de Cr(VI) y Pb(II) a pH 5.

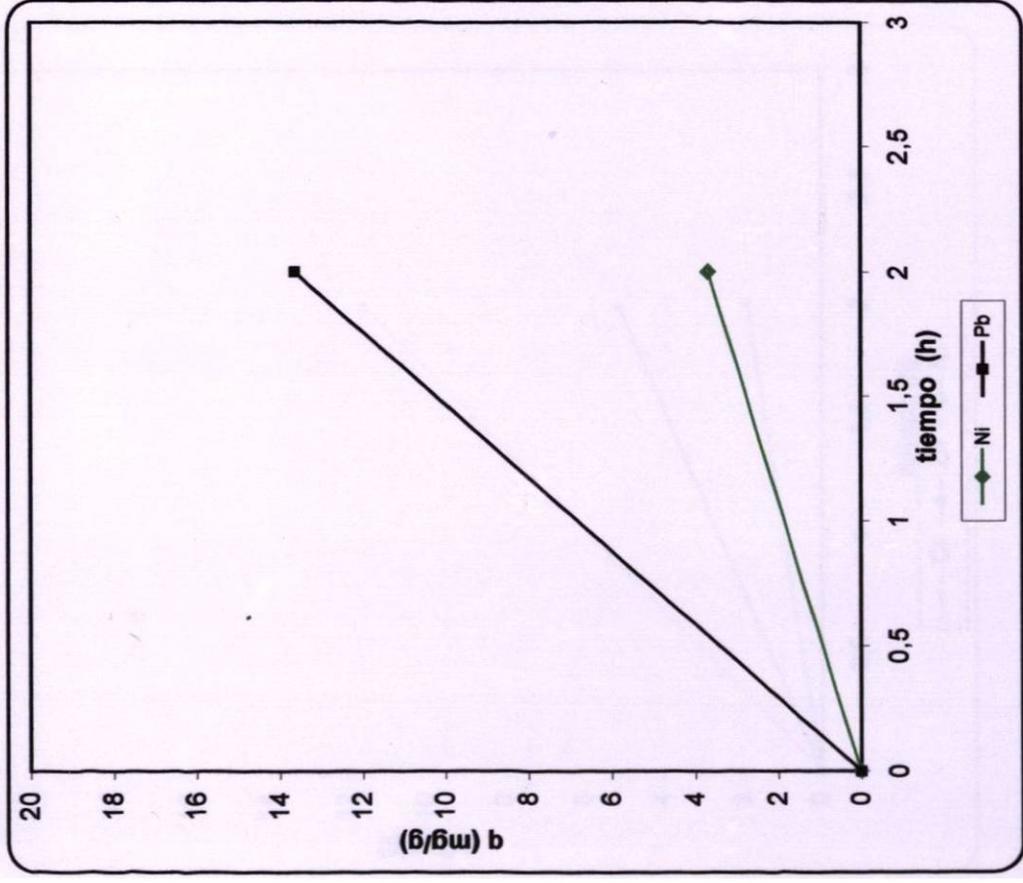


Figura 10.- Variación de la capacidad sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla binaria de Ni(II) y Pb(II) a pH 5.

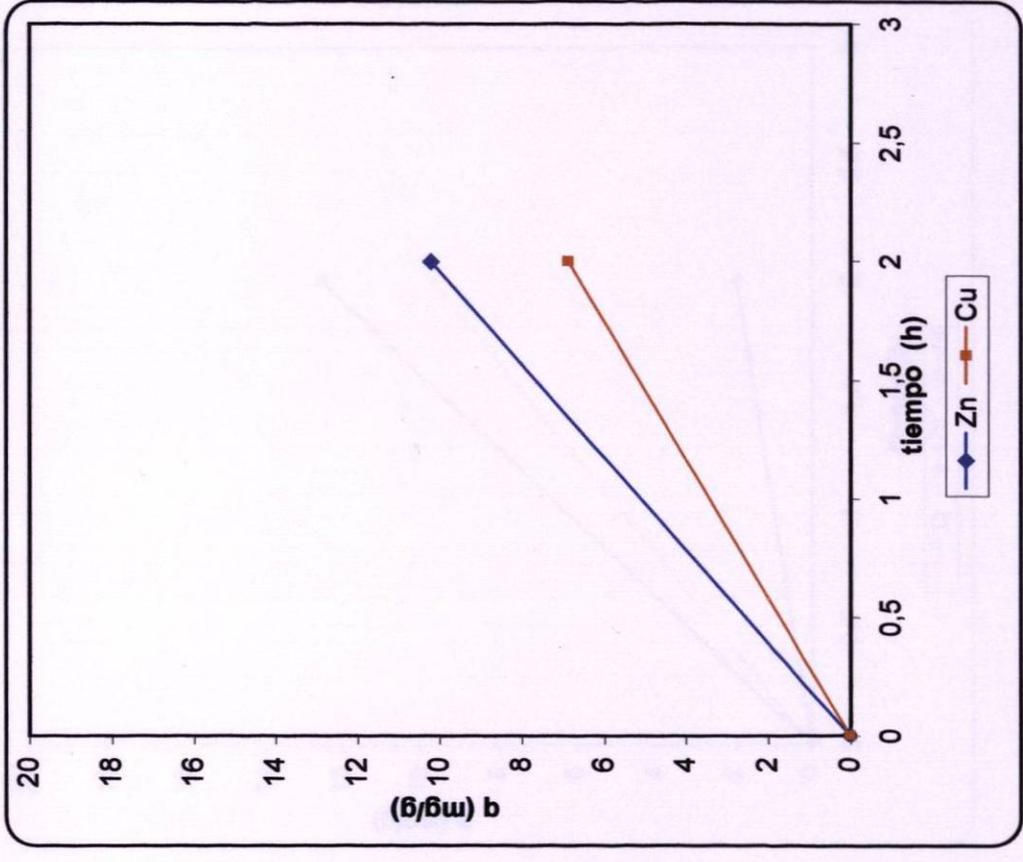


Figura 11.- Variación de la capacidad sorción metálica de biomasa *R. mucilaginosa* en una mezcla binaria de Cu(II) y Zn(II) a pH 5.

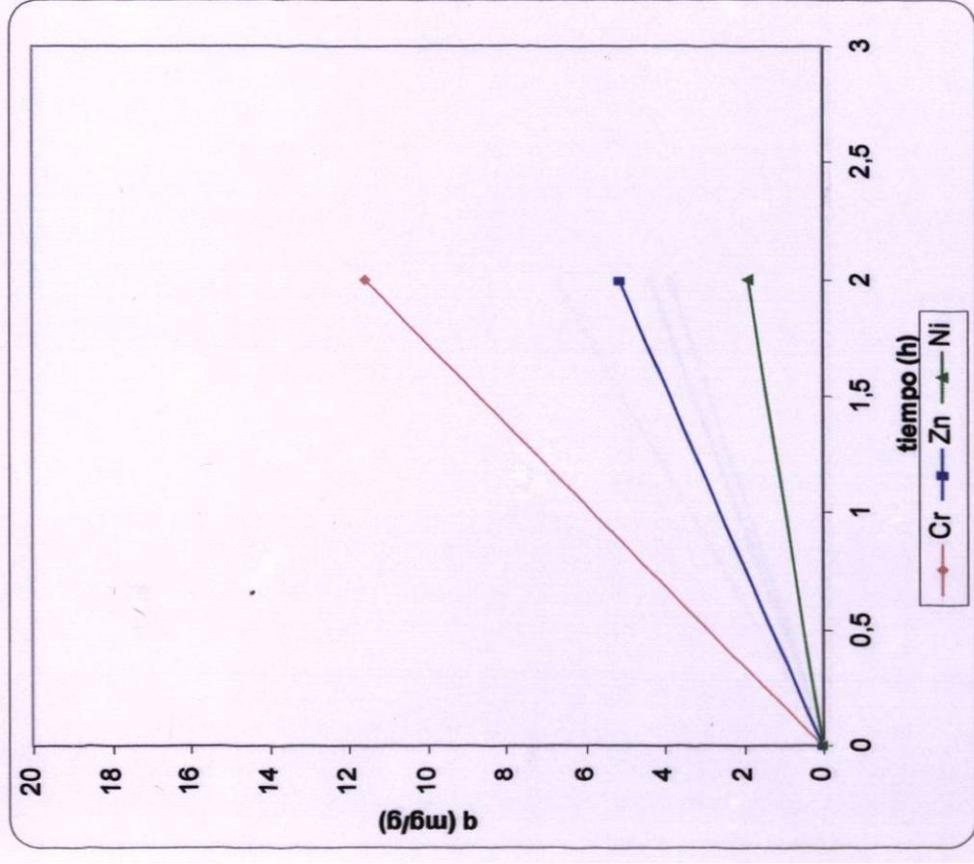


Figura 12.- Variación de la capacidad sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla de Cr(VI), Ni(II) y Zn(II) a pH 5.

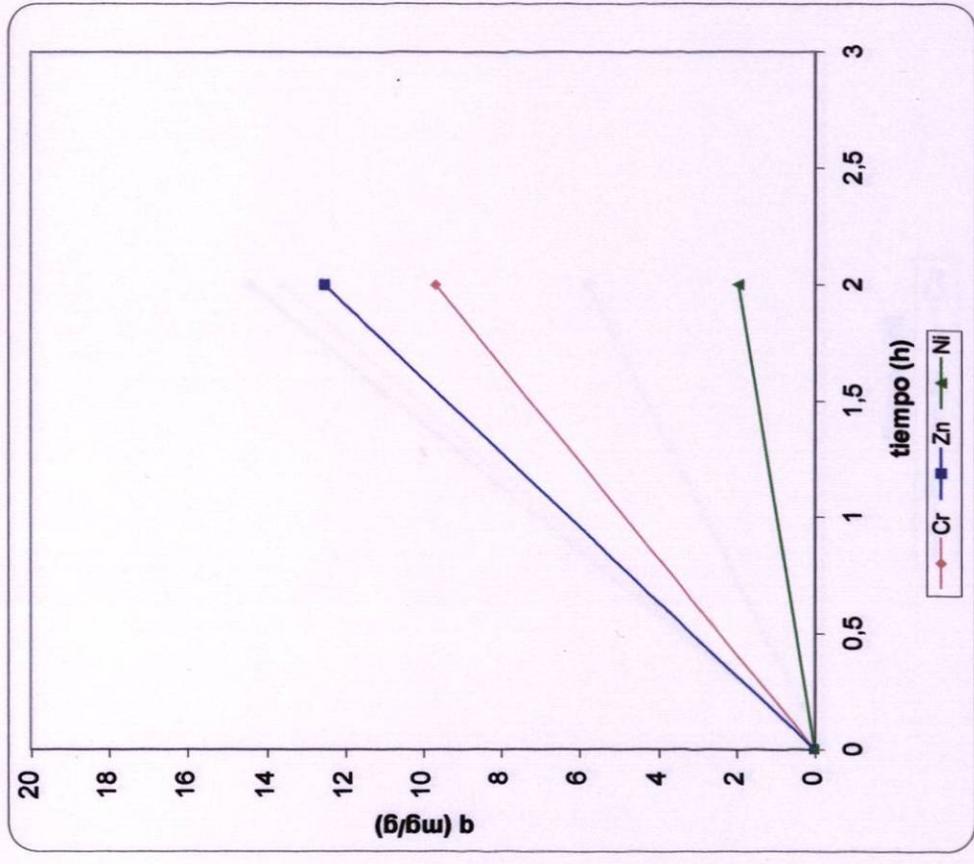


Figura 13.- Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla de Cr(VI), Ni(II) y Zn(II) a pH 5.

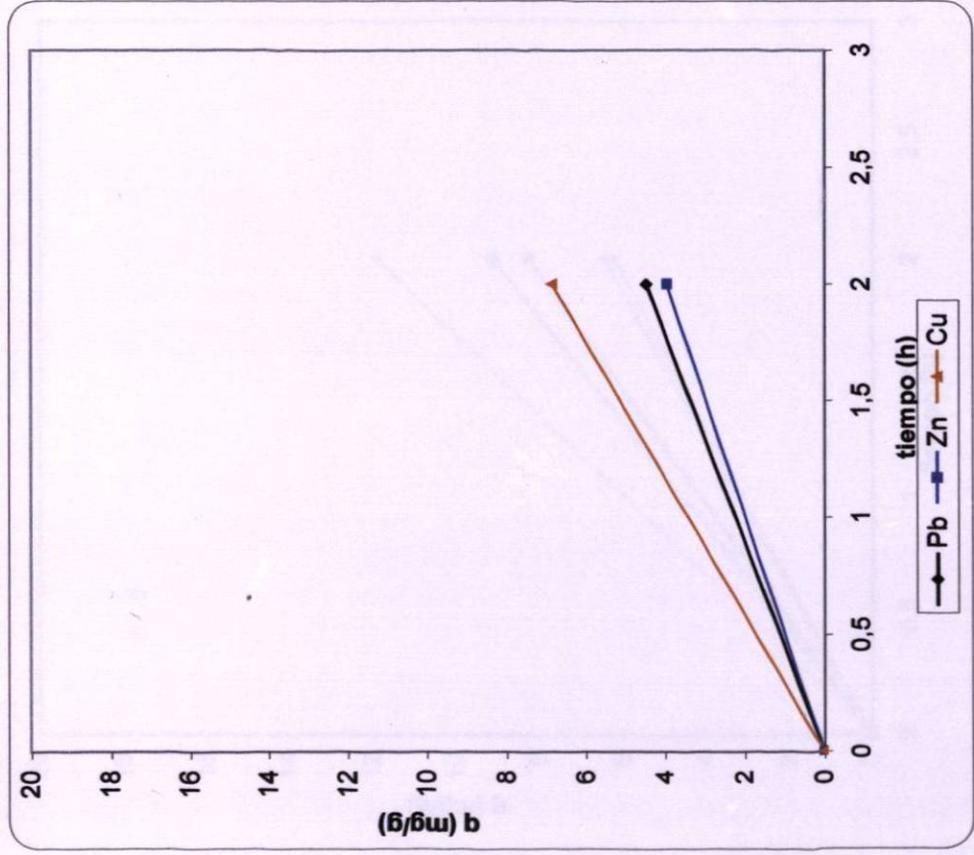


Figura 14.-Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla de Cu(II), Pb(II) y Zn(II) a pH 5.

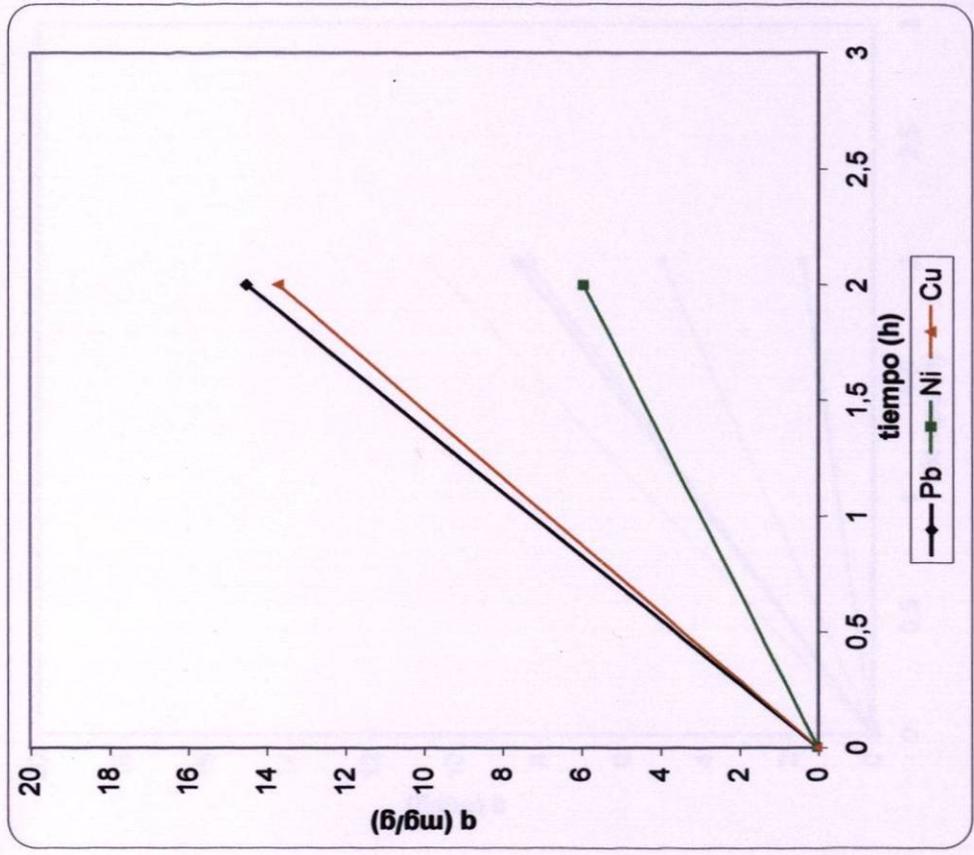


Figura 15.- Variación de la capacidad de sorción metálica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla de Cu(II), Ni(II) y Pb(II) a pH 5.

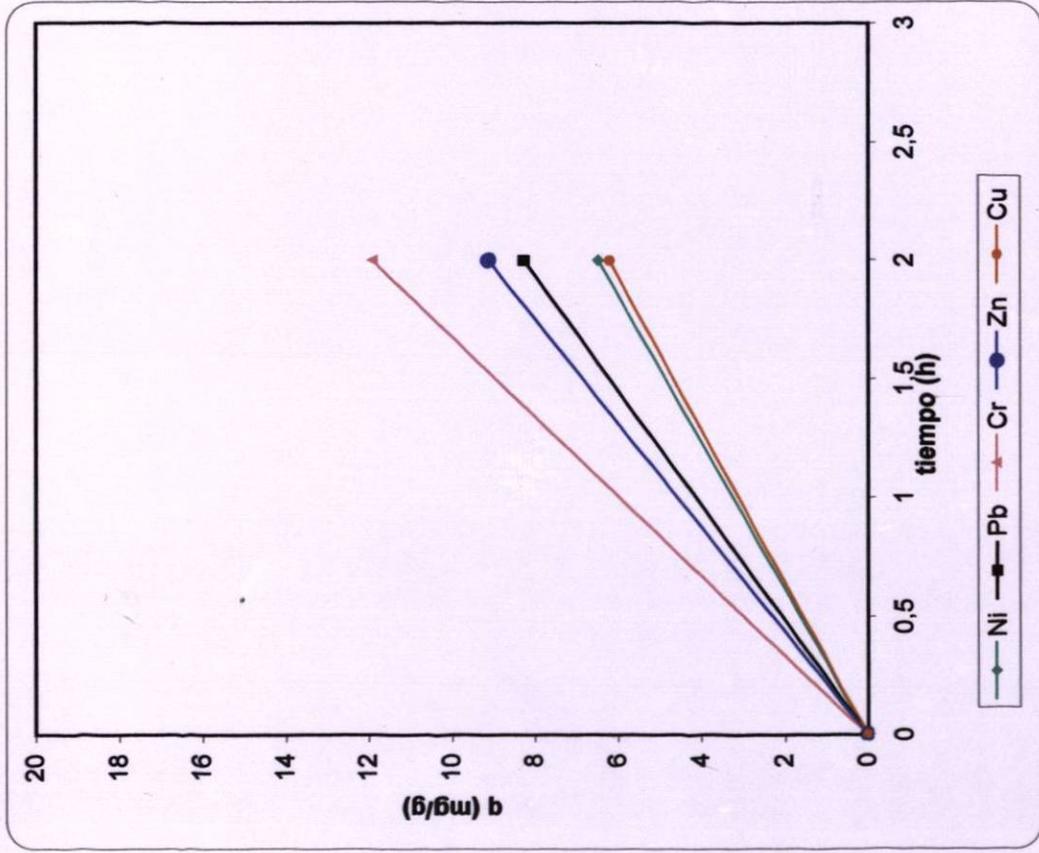


Figura 16.- Variación de la capacidad de sorción metólica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla polimetálica a pH 2.

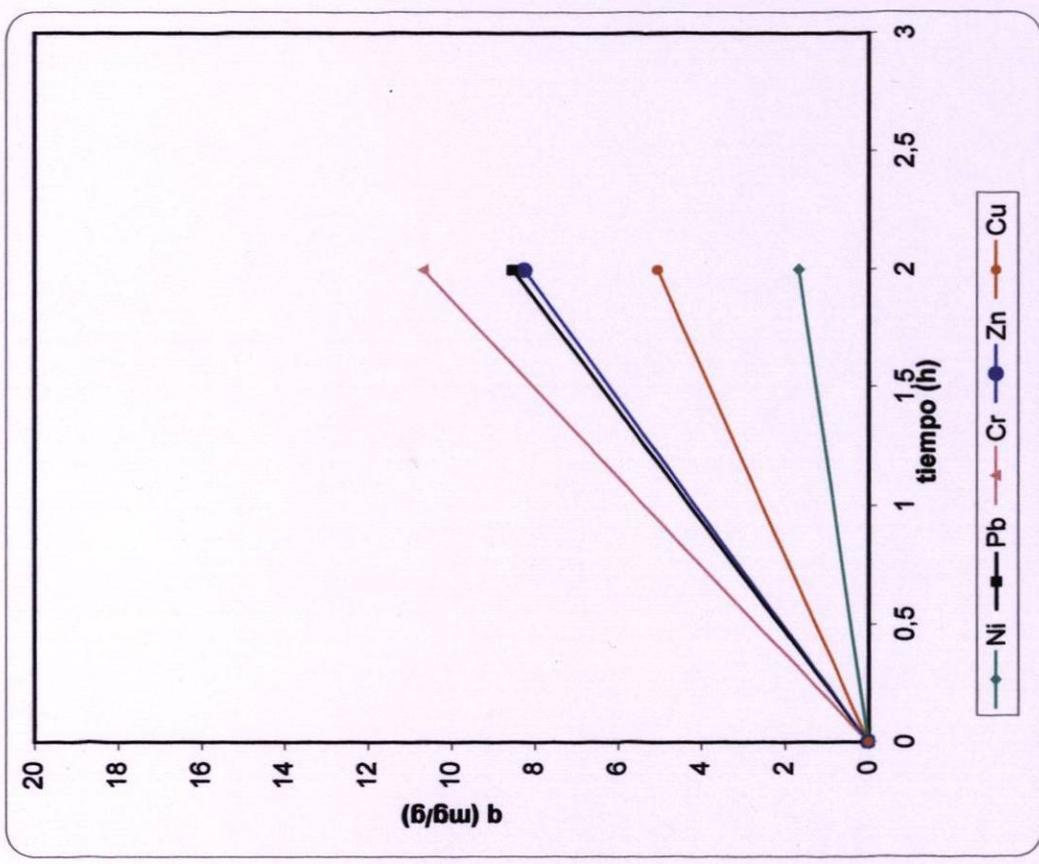


Figura 17.- Variación de la capacidad de sorción metólica de biomasa de *R. mucilaginosa* en una mezcla polimetálica a pH 5.

