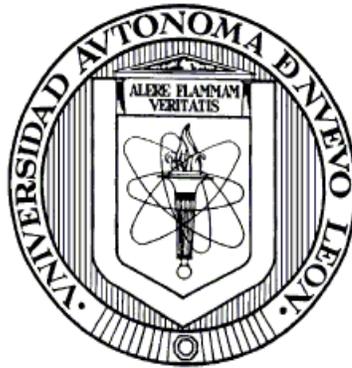


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO
LEVADURA DE PANADERÍA

Por

REYNALDO DE JESÚS COBOS GARCÍA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con orientación en
Procesos Sustentables

Octubre, 2 0 0 9

REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO
LEVADURA DE PANADERÍA

Aprobación de la tesis:

Asesora de la Tesis
Dra. María Teresa Garza González

Revisora
Dra. Rosa del Carmen Miranda Guardiola

Revisora
Dra. María Elena Rodríguez Cantú

Revisora
M.C. María Elena Cantú Cárdenas

Subdirector de Estudios de Posgrado
Dra. María Teresa Garza González

RESUMEN

Reynaldo de Jesús Cobos García Fecha de graduación: Noviembre, 2009

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias Químicas

**Título del Estudio: REMOCIÓN DE AZUL DE METILENO UTILIZANDO
LEVADURA DE PANADERÍA.**

Número de páginas: 60

**Candidato para el grado de Maestría en
Ciencias con orientación en Procesos
Sustentables**

Área de Estudio: Biotecnología

Propósito y Método del Estudio: La biosorción es una técnica en la que se utiliza biomasa viva o muerta tanto en suspensión como inmovilizada para la remoción de sustancias tóxicas a partir de disoluciones acuosas. En el presente trabajo se desarrollaron varios ensayos para la remoción del azul de metileno por sorción haciendo uso de la levadura de panadería. En primera instancia se determinaron las condiciones que favorecían el proceso de sorción de este colorante, usando biomasa deshidratada de *Saccharomyces cerevisiae*, mediante un diseño de experimentos factorial 3^3 . Se varió el pH, la temperatura y concentración de biomasa a tres niveles. Además, se evaluaron las isotermas experimentales de adsorción con dos diferentes modelos: Langmuir y Freundlich, siendo el primero el que describe mejor el proceso de sorción. También se realizó una cinética de biosorción tomando en cuenta las mejores condiciones de sorción obtenidas del primer experimento, y se determinó la eficiencia de la sorción (% de remoción), la capacidad de sorción de la biomasa (q mg/g), el tiempo de equilibrio y la constante de velocidad de sorción. Finalmente, se eluyó el colorante de la biomasa con ácido clorhídrico 0.1 M, para una posible reutilización de la biomasa y se determinó la eficiencia de recuperación del colorante.

Contribuciones y Conclusiones: El aporte del presente estudio es la aplicación de un material de bajo costo y fácil de obtener para la remoción de contaminantes tóxicos específicamente el colorante azul de metileno. En este trabajo se demostró que la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* es un biosorbente eficiente, económico y ecológico para la remoción de contaminantes como el azul de metileno y con posibilidades de utilizarse exitosamente en el tratamiento de efluentes industriales especialmente de la industria textil. Las condiciones que favorecieron la remoción del colorante fueron: pH 5, temperatura de 25 °C y una concentración de biomasa de 2g/L. Las isotermas experimentales se ajustaron al modelo de Langmuir y en las condiciones de trabajo la biomasa presentó una capacidad máxima de adsorción (q máx) de 167.5 mg/g, superior a la reportada en la literatura para otras levaduras. El orden de reacción que describe el proceso de biosorción de azul de metileno corresponde a un modelo cinético de pseudo segundo orden y la mayor remoción se presenta en los primeros cinco minutos de reacción. La recuperación del colorante con ácido clorhídrico 0.1 M fue de 70 %. Los datos obtenidos, pueden servir como base para el estudio de nuevos biosorbentes de contaminantes provenientes de efluentes especialmente de la industria textil.

FIRMA DEL ASESOR: _____

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada para el estudio de mi maestría, así como también al apoyo económico otorgado por el proyecto PAICYT CA-1489-07

A la Doctora Teresa Garza, por su apoyo y paciencia.

A las Doctoras Rosy Miranda, María Elena Rodríguez y María Elena Cantú

A Rosy, Mayra, Viridiana y Daniel compañeros de trabajo.

A la Ing. Químico Sonia Maldonado, al M.C. Jesús M. Navarro R. y al M.C. Roberto Rolando Salinas por su colaboración intelectual.

DEDICATORIA

A mi madre

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	3
1.1.1 Tratamientos físico-químicos para la purificación de agua.....	8
1.1.2 Tratamiento Biológico.....	9
1.2 Colorantes.....	10
1.2.1 Contaminación por colorantes.....	10
1.2.2 Colorante Azul de Metileno	11
1.3 Remoción de colorantes.....	13
1.3.1 Biosorción	13
1.3.2 Isotermas de adsorción	14
1.3.2.1 Isoterma de Langmuir	16
1.3.2.2 Isoterma de Freundlich.....	17
1.3.2.3 Isoterma de Temkin.....	17
1.4 Cinética de biosorción.....	18
1.4.1 Modelo cinético de pseudo primer orden	19
1.4.2 Modelo cinético de pseudo segundo orden.....	19
1.5 Hipótesis	20
1.6 Objetivo general	20
1.7 Objetivos particulares.....	21
2. MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1 Experimentos de biosorción.....	22
2.2 Determinación de las condiciones de biosorción	22
2.3 Determinación de la cinética de biosorción.....	24
2.4 Elaboración de las isotermas de adsorción.....	25
2.5 Elución del colorante azul de metileno	25
2.6 Disposición de los residuos generados.....	26
3. RESULTADOS	27
3.1 Determinación de las condiciones de biosorción	27
3.1.1 Análisis estadístico de los resultados del diseño de experimentos	29
3.1.2 Efecto del pH sobre la sorción de AM	33
3.1.3 Efecto de la temperatura sobre la sorción de AM	35

3.1.4 Efecto de la concentración de biomasa sobre la sorción de AM.....	36
3.2 Cinética de Biosorción.....	38
3.2.1 Cinética de Biosorción.....	38
3.2.2 Modelo cinético de pseudo primer orden.....	40
3.2.3 Modelo cinético de pseudo segundo orden.....	41
3.3 Isotermas de adsorción.....	44
3.3.1 Isotermas de adsorción.....	44
3.4 Recuperación del colorante.....	50
4. CONCLUSIONES.....	52
5. RECOMENDACIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
TABLA I: Diferentes tipos de microorganismos estudiados para la remoción de colorantes.	4
TABLA II: Resumen de las capacidades de remoción de colorantes de distintos tipos de biomasa.	7
TABLA III: Diseño de experimentos 3^3	23
TABLA IV: Efecto de las variables en la biosorción.	27
TABLA V: Análisis de varianza.	30
TABLA VI: Resultados de experimentación para una reacción de pseudo primer orden.	40
TABLA VII: Resultados de experimentación para una reacción de pseudo segundo orden.	42
TABLA VIII: Resultados experimentales de los isothermas de adsorción.	44
TABLA IX: Resultados de las variables para las ecuaciones de Langmuir y Freundlich.	48
TABLA X: Comparación de la capacidad máxima de adsorción de otros sorbentes utilizados en la remoción de azul de metileno.	49
TABLA XI: Resultados de los experimentos de desorción de azul de metileno de la biomasa de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .	50

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1: Estructura química del azul de metileno	11
Figura 2: Tipos de isothermas	14
Figura 3 Influencia de la concentración de biomasa y el pH sobre la capacidad de sorción de la biomasa de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> para remover azul de metileno a 25 °C	31
Figura 4 Influencia de la concentración de biomasa y el pH sobre la remoción de azul de metileno por biomasa de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> a 25 °C	31
Figura 5. Distribución normal de los resultados	32
Figura 6. Comportamiento de los resultados experimentales con los predichos	33
Figura 7. Efecto del pH sobre la remoción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a temperatura de 25 °C.	33
Figura 8. Efecto de la temperatura sobre la remoción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5.	35
Figura 9. Efecto de la concentración de biomasa sobre la remoción de azul de metileno utilizando levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.	36

Figura	Página
Figura 10. Variación de la concentración de azul de metileno de una disolución de 50 ppm, utilizando 2g/L de levadura de panadería a pH 5 y temperatura de 25 ° C.	38
Figura 11. Variación de la capacidad de sorción de azul de metileno en una disolución de 50 ppm utilizando 2g/L de levadura de panadería a pH 5 y temperatura de 25 ° C.	39
Figura 12. Gráfica de modelo de primer orden.	41
Figura 13. Gráfica de modelo de segundo orden.	43
Figura 14. Comparación de los datos de capacidad de adsorción experimental con los simulados	44
Figura 15. Comparación de isothermas de adsorción experimental y Langmuir del azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.	45
Figura 16. Comparación de isothermas de adsorción experimental y Freundlich del azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.	46
Figura 17. Modelo de Langmuir para la adsorción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.	46
Figura 18. Modelo de Freundlich para la adsorción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 a 25 ° C.	47

LISTA DE SÍMBOLOS

AM	Azul de metileno
A	Constante de equilibrio de enlace
ANOVA	Análisis de Varianza
B	Constante relacionada con el calor de adsorción
b	Afinidad que presenta la biomasa por el contaminante (L/mg)
BET	Brunauer, Emmett y Teller
°C	Grados Celsius
C	Concentración inicial del sustrato
C_e	Concentración en el equilibrio (ppm)
C_f	Concentración final de la disolución de colorante (ppm)
C_i	Concentración inicial de la disolución de colorante (ppm)
C_{máx}	Concentración máxima
F	Estadístico F
g/L	Gramos por litro
h	Constante de Planck
HCl	Ácido clorhídrico
K₁	Constante de velocidad de pseudo primer orden (min ⁻¹)
K₂	Constante de velocidad de pseudo segundo orden [g/(g/mg.min)]
K_{ads}	Constante aparente de equilibrio de adsorción
R²	Coefficiente de correlación
K_f	Constante de Freundlich ((mg/g)/(L/g) ⁿ)
M	Molaridad
mL	Mililitros
n	Parámetro de Freundlich
NaOH	Hidróxido de sodio
nm	Nanómetro
p	Valor estadístico
pH	Logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno
ppm	Partes por millón
q_e	Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)
q_m	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)

q_t	Capacidad de adsorción en un tiempo determinado (mg/g)
q_{exp}	Capacidad de adsorción experimental (mg/g)
q_s	Capacidad de adsorción simulada (mg/g)
R	Constante universal de los gases
rpm	Revoluciones por minuto
T	Temperatura absoluta en °K
t	Tiempo (min)
t_{eq}	Tiempo de equilibrio (min)
UV-Vis	Ultravioleta-Visible
V	Volumen de la disolución de colorante (L)
Vis	Visible
W	Cantidad de biomasa (g)
⊙	Recubrimiento superficial
λ	Longitud de onda

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Grandes cantidades de colorantes son producidas anualmente y aplicados a la industria textil, cosméticos, papel, curtido, farmacéutica, alimentos y otras. Aún con pequeñas concentraciones de colorante (10-50 mg/ml) se ve afectada la estética, la transparencia del agua y la solubilidad de oxígeno en los cuerpos de agua.

Muchos métodos físicos y químicos incluyendo: coagulación, floculación, precipitación, filtración, adsorción, degradación química, ozonización y oxidación han sido usados para el tratamiento de efluentes que contienen colorantes¹. La coagulación y floculación usan polielectrolitos, cal, alúmina o sales ferrosas que producen grandes cantidades de lodo tóxico acarreando problemas de depósitos y con un alto costo en los productos². Se han presentado alternativas de adsorbentes tales como carbón activado y sílica gel que han sido probados y usados para la remoción de colorantes y el tratamiento de efluentes textiles, pero presentan el inconveniente de su alto costo³.

Los colorantes no son fácilmente degradados por los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales, ellos son estables a la luz, calor, agentes oxidantes y muchos de ellos no son biodegradables por lo que han sido identificados como compuestos problemáticos en los efluentes de la industria textil y su remoción es de gran importancia⁴.

La remoción de compuestos químicos en soluciones acuosas con masa microbiana por medio de la biosorción es una buena alternativa para el tratamiento de aguas residuales, el término biosorción es usado para indicar un número de procesos metabólicos independientes (adsorción física y química,

intercambio iónico, complejación, quelatación y microprecipitación), tomando lugar principalmente en la pared celular de los microorganismos. El mecanismo de unión a la biomasa depende de la naturaleza química del contaminante (especie, tamaño, carga iónica), tipo de biomasa, preparación, propiedades de la superficie y condiciones ambientales como: pH, temperatura, fuerza iónica, presencia de ligandos orgánicos e inorgánicos en solución entre otras.

Los materiales que son usados como biosorbentes para remover colorantes deben reunir las siguientes características: bajo costo, alta capacidad de sorción, aplicable a efluentes que contienen una amplia variedad de colorantes y tener la capacidad de tolerar la presencia de otros contaminantes tales como sales, metales pesados y otras condiciones que presentan las aguas residuales⁵.

Algunos tipos de biomasa microbiana han mostrado tener capacidad para eliminar contaminantes de medios acuosos. Los microorganismos pueden utilizarse vivos o muertos, en forma libre o inmovilizada. La interacción entre microorganismos (levaduras, bacterias y hongos) y colorantes depende de sus propiedades químicas, cada colorante tiene cierta afinidad por varios microorganismos y por otro lado un microorganismo es capaz de unirse o degradar diferentes tipos de colorantes⁶.

La remoción de colorantes mediante biosorción ofrece una alternativa atractiva para la solución de problemas de contaminación presentes y futuros, por lo que en este proyecto se propone estudiar diferentes parámetros para evaluar y mejorar la eficiencia de la levadura de panadería como biosorbente de colorantes.

1.1 Antecedentes

Las levaduras son hongos unicelulares que se reproducen en forma asexual por gemación o fisión binaria. La levadura utilizada en panificación es *Saccharomyces cerevisiae*. Esta levadura presenta múltiples aplicaciones en el área alimentaria. Además dado su estructura y composición celular, en los últimos años se ha orientado su uso también al área ambiental, especialmente para la eliminación de contaminantes de medios acuosos. Entre estos contaminantes se encuentran los colorantes, los cuales tienen múltiples aplicaciones en la industria textil, cerámica, plásticos, alimentaria, así como en el área biológica.

La eliminación de azul de metileno se ha realizado con diferentes tipos de materiales tales como: hojas de plantas ⁷, hierbas ⁸, polipropileno⁹, perlita¹⁰, cascarilla de trigo ¹¹, entre otros. Sin embargo la remoción de este colorante no ha sido estudiada utilizando la biomasa de levadura de pan.

En la literatura se mencionan diferentes tipos de levaduras utilizadas para la remoción de colorantes, entre las que se encuentran preferentemente especies del género *Candida*, *Kluyveromyces* *Schizosaccharomyces* ² y *Saccharomyces*^{12, 13}.

Estos estudios, también se han realizado utilizando biomasa de diversos microorganismos entre los que se mencionan tanto procariotas como eucariotas (Crin, 2006)⁵. La tabla I resume algunos de estos estudios.

La remoción de colorantes mediante la bioadsorción es afectada por diferentes factores, tales como pH, temperatura y concentración de biomasa entre otros.

TABLA I

DIFERENTES TIPOS DE MICROORGANISMOS ESTUDIADOS PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES

Procariotas			Eucariotas		
Microorganismo	Colorantes	Referencia	Microorganismo	Colorantes	Referencia
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Anaranjado ácido 7, Amarillo directo 4, Negro reactivo NR, Azul reactivo 160, Rojo reactivo 198	Chen <i>et al.</i> (2003) ¹⁴	<i>Caulerpa scalpelliformis</i>	Amarillo básico	Rathinam <i>et al.</i> (2007) ¹⁵
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Antraquinona-2,6-disulfonato	Cervantes <i>et al.</i> (2003) ¹⁶	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Azul reactivo 19	Aksu y Dönmez (2003) ²
<i>Sphingomonas Xenophaga</i>	Rojo reactivo 2	Zee van der <i>et al.</i> (2003) ¹⁷	<i>Schizosaccharomyces pombe</i>	Azul reactivo 19	Aksu y Donmez (2003) ²
<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Rojo de metilo	ltho <i>et al.</i> (2002) ¹⁸	<i>Coriolus versicolor</i>	Anaranjado ácido 7	Sam y Yesilada (2001) ¹⁹ ; Lin <i>et al.</i> (2003) ²⁰
<i>Xenophilus azovorans</i>	Anaranjado carboxilo II	Blumel <i>et al.</i> (2002) ²¹	<i>Irpex lacteus</i>	Azul reactivo 19	Maximo <i>et al.</i> (2003) ²² ; Bhatt <i>et al.</i> (2000) ²³ ; Kasinath <i>et al.</i> (2003) ²⁴

El pH tiene una fuerte influencia sobre los sitios de unión del colorante a la biomasa y sobre la solubilidad del colorante. Se han realizado diversas investigaciones sobre el efecto del pH, entre las que se pueden citar los estudios realizados por Farah J.Y., *et al.*, (2007) utilizando biomasa de *Saccharomyces cerevisiae*, quienes reportan un pH de 7 para la remoción de azul de astrazona.¹² Por otro lado Patel, R. y Suresh, S. en el 2008, trabajaron con biomasa de *Aspergillus foetidus*, para remoción del colorante negro 5 con una alta eficiencia a pH de 2-3²⁵. Así mismo, Aksu Z., en el 2005 reporta altas capacidades de remoción de los colorantes rojo gemación H-E7B (GR), azul

turquesa gemasol G (GTB) y negro gemactivo HFGR (GB) a pH 2 utilizando biomasa de *Rhizopus arrhizus*⁴. En otras investigaciones Binupriya A.R., *et al*, (2008) estudiaron la remoción del colorante rojo congo mediante pellets de micelio modificado y nativo de *Trametes versicolor* y determinaron el pH de 4 como óptimo para la remoción²⁶.

En resumen el pH seleccionado depende de la clase de colorante que se remueva y de la biomasa que se utilice; en general colorantes básicos requieren condiciones neutras o alcalinas¹², mientras que la remoción de colorantes ácidos requiere de pH ácidos.²⁷ Así mismo, la carga superficial de la biomasa estará en función del pH.

Otro factor que afecta la remoción de colorantes es la temperatura; Farah J.Y., *et al.*, (2007) encontraron que a temperatura de 30 °C, la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae*, presentó su capacidad máxima de remoción de azul de astrazona¹², mientras que Patel R., y Suresh S., (2008) reportan la mayor remoción a 50°C para el colorante negro 5, mediante la biomasa de *Aspergillus foetidus*²⁵. En general se prefiere que el proceso de biosorción se lleve a cabo a temperatura ambiente para que no se eleven los costos del proceso²⁸.

Aksu Z. y Isoglu A. (2006) encontraron que la capacidad de adsorción del azul turquesa gemasol G por residuos de la pulpa de remolacha se ve afectada a diferentes temperaturas, la concentración del colorante inicial fue de 100 ppm. La capacidad de adsorción a 25 °C fue de 83.7 mg/g y a 45 °C disminuyó a 66.1 mg/g²⁹.

La cantidad de bioadsorbente tiene una fuerte influencia en la remoción de colorantes. En algunos casos bajas dosis de bioadsorbente, rinden altos porcentajes de remoción.²⁸ Un incremento de la cantidad de biomasa, generalmente eleva la remoción ya que se aumenta el número de sitios de

unión del colorante a la biomasa. Sin embargo la biomasa puede aglomerarse y ocultar algunos de los sitios de unión³⁰.

La capacidad de la biomasa para remover sustancias tóxicas se evalúa a través de isothermas de equilibrio experimental. Para esto se pone en contacto una concentración conocida del material biosorbente con una serie de disoluciones a concentraciones crecientes del material tóxico y se establece un equilibrio entre la concentración de este material enlazada a la biomasa y la concentración del mismo que permanece en solución.

La relación entre la cantidad de metal o colorante unido a un adsorbente y la concentración de equilibrio a una temperatura constante se denomina isoterma de adsorción.

Vítor J. P. (2007) y colaboradores investigaron la remoción del azul de metileno por el alga *Gelidium* a concentraciones del colorante entre 40 ppm y 800 ppm, a 20 °C y a un pH de 6, obteniendo en esta isoterma una capacidad máxima de adsorción de 167.5 mg/g³¹.

Estos antecedentes demuestran que la biomasa es capaz de remover los colorantes de medios acuosos y que el uso de este método de bioadsorción tiene un futuro muy prometedor.

La tabla II muestra la capacidad máxima de adsorción q_m (mg/g) para varios microorganismos.

TABLA II
RESUMEN DE LAS CAPACIDADES DE REMOCIÓN DE COLORANTES
DE DISTINTOS TIPOS DE BIOMASAS MICROBIANAS

Biomasa	Colorante	q_m ($^{mg}/g$)	Referencia
<i>Chlorella vulgaris</i>	Rojo reactivo 5	555.6	Aksu y Tezer (2005) ³²
<i>Saccharomyces</i> sp.	Azul de remazol	173.1	Aksu y Dönmez (2003) ²
<i>Spirodela polyrrhiza</i>	Azul básico 9	144.93	Waranusantigul <i>et al.</i> (2003) ⁸
<i>Aspergillus niger</i>	Azul ácido 29	13.82	Fu y Viraraghavan (2001) ³³
<i>Aspergillus niger</i>	Azul ácido 29	6.63	Fu y Viraraghavan (2002) ³⁴
<i>Aspergillus foetidus</i>	Negro 5	106	Patel and Suresh, (2008) ²⁵
<i>Trametes versicolor</i>	Rojo Congo	52.32	Binupriya <i>et al.</i> (2008) ²⁶
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Azul de Antrazona	70	Farah <i>et al.</i> (2007) ¹²
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Azul de anilina	220	Safarikova <i>et al.</i> (2004) ¹³
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Rojo congo	93.1	
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Safranina O	46.6	
<i>Rhizopus arrhizus</i>	Rojo gemación H-E7B	1007.8	Aksu <i>et al.</i> (2005) ⁴

Por otro lado, para muchas aplicaciones prácticas, los estudios cinéticos son de gran importancia²⁶, ya que éstos generan datos que permiten entender mejor el proceso de bioadsorción, tales como la velocidad de remoción así como el tiempo en que se establece el equilibrio de bioadsorción³⁵.

Una de las preguntas más comunes sobre la bioadsorción es en relación a la disposición de la biomasa una vez que se realizó la bioadsorción. Binupriya A.R., *et al*, (2007) sugieren el proceso de recuperación de los colorantes para su reutilización y posterior uso en la industria del vidrio, cerámica o de plásticos. Además la biomasa puede ser también reutilizada en varios ciclos de remoción, lo que impacta positivamente en el costo del proceso³⁶.

Se han estudiado diversos agentes para recuperar el colorante, por lo que se pueden citar los siguientes: Patel R. y Zurres S. (2008) hicieron un ensayo con *Aspergillus foetidus*, investigaron la desorción del colorante negro 5,

la recuperación del adsorbato (colorante) y adsorbente (biomasa del hongo) fue posible usando hidróxido de sodio 0.1 M, con lo que obtuvieron un 90% de recuperación del colorante, por lo que la biomasa del hongo puede ser reciclada varias veces²⁵.

Algunas otras soluciones que han sido probadas como efectivos agentes de elución del colorante cristal violeta adsorbido en biomasa de *Saccharomyces cerevisiae*, son mezclas de metanol-ácido acético (50:1, v/v) y metanol-hidróxido de amonio concentrado (50:1, v/v), lográndose una recuperación del colorante del 92% y 86 % respectivamente. Con este último agente de elución, también se logró recuperar el 55% del colorante azul de anilina¹³.

1.1.1 *Tratamientos físico-químicos para la purificación de agua*

Las aguas contaminadas por la actividad humana, pueden ser procesadas por plantas de tratamiento o por tratamientos químicos convencionales como la cloración y ozonización, sin embargo, en algunos casos estos procedimientos resultan ineficientes para alcanzar el grado de descontaminación requerido por normativas legales o para el uso posterior del efluente tratado.

Estas exigentes normas de calidad del agua, han estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, que implican esfuerzos que requieren grandes inversiones de capital. Los tratamientos físico-químicos como: coagulación, floculación, oxidación, precipitación y adsorción, han mostrado ser efectivos³⁷.

Estos tratamientos presentan limitaciones, como exceso en la cantidad de productos químicos, acumulación de lodos con altas concentraciones de

óxidos y alto costo de instalación y mantenimiento, lo que impide que las pequeñas y medianas empresas adopten alguna de estas tecnologías¹. Otra alternativa que se presenta es una tecnología amigable con el medio ambiente, llamada tratamiento biológico.

1.1.2 *Tratamiento Biológico*

Los tratamientos biológicos como la degradación microbiana, biosorción por biomasa microbiana y sistemas de biorremediación, son alternativas más económicas comparadas con los procesos físicos y químicos y son comúnmente aplicados para el tratamiento de efluentes industriales. Las principales ventajas de las tecnologías biológicas para la remoción de contaminantes son su bajo costo y alta eficiencia.

La adsorción es un proceso por el cual las moléculas se adhieren a superficies sólidas. La atracción a menudo se da debido a cargas electrostáticas. El término adsorción implica un fenómeno de superficie, la captura misma puede ocurrir ya sea por fenómenos físicos (adsorción física) o mediante una variedad de enlaces químicos (quimisorción). Mientras que la adsorción física no es selectiva con respecto a las especies químicas adsorbidas, la quimisorción si lo es. Las moléculas adsorbidas son retenidas en la superficie por fuerzas de valencia del mismo tipo como las que ocurren entre átomos y moléculas. Algunos ejemplos de la quimisorción son el acomplejamiento de metales y la quelatación³⁸.

La biosorción es una técnica que utiliza biomasa viva, muerta, de forma libre o inmovilizada para la remoción y recuperación del material contaminante a partir de disoluciones acuosas. Este proceso involucra una fase sólida (adsorbente) y una fase líquida (adsorbato), esta última es por lo general agua que contiene las especies disueltas que van a ser adsorbidas. Este proceso

continúa hasta que se establece un equilibrio entre el adsorbato disuelto y éste mismo cuando ya está enlazado a la fase sólido³⁹.

La remoción de colorantes por medio del proceso de biosorción, es una alternativa atractiva para solucionar problemas de contaminación. Se han estudiado diferentes materiales biológicos para la eliminación de colorantes en efluentes industriales que pueden realizar su remoción mediante el proceso de biosorción.³⁶

La estructura de la pared celular de ciertas algas, hongos y bacterias es la responsable del fenómeno de biosorción y ha demostrado poseer propiedades adsorbentes de diversos contaminantes.⁴⁰ En el presente trabajo se hizo uso de la levadura de panadería comercial, la cual es la *Saccharomyces cerevisiae*. La biomasa, tal como se recibe, es de color amarillo y de textura fibrosa y frágil.

1.2 Colorantes

1.2.1 *Contaminación por colorantes*

Los colorantes son sustancias orgánicas de color intenso que imparten color a una sustancia incolora, o bien, a un sustrato por medio de una absorción selectiva de luz. Son sustancias persistentes en aguas residuales, representando un problema grave de contaminación, por no degradarse aún después de un tratamiento convencional y algunos de ellos son altamente tóxicos y no biodegradables.

Los colorantes utilizados en la industria son causa importante de contaminación en los ecosistemas acuáticos, se encuentran en descargas de la industria textil, alimentaria, de plásticos, papel y farmacéutica⁴¹.

tiene una estructura simple que permite el estudio del mecanismo de la adsorción.

Uno de los métodos de coloración-fijación con AM es utilizado en biología molecular y en inmunología para el diagnóstico de laboratorio del parásito *Trichomonas vaginalis*⁴⁵. Este colorante es aplicado para tratar las enfermedades de metahemoglobinemia y de Alzheimer, de igual manera podría ser utilizado en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson; y también como antiséptico y cicatrizador interno⁴⁶.

Es usado como indicador para determinar si una célula como la levadura está viva, el AM se vuelve incoloro en presencia de enzimas activas, lo que indica que la célula está viva. Sin embargo, si permanece el color azul, esto no significa necesariamente que la célula está muerta, las enzimas podrían estar inactivas o desnaturalizadas. Este colorante puede inhibir la respiración de la levadura, ya que recoge iones de hidrógeno formados durante el proceso. Las células de levadura no pueden usar después esos iones para liberar energía.

En neurociencia, el AM puede servir como un inhibidor no selectivo de enzimas, así como en la acuicultura de peces tropicales para el tratamiento de las infecciones por hongos⁴³.

1.3 Remoción de colorantes

1.3.1 *Biosorción*

La biosorción es un proceso que aprovecha la habilidad de los materiales biológicos que retienen selectivamente los cationes que se encuentran en la disolución acuosa³⁹.

El término bioadsorción, se utiliza para referirse a la captación que tiene la biomasa por los contaminantes, a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico.

La biosorción es una técnica ampliamente utilizada para remover ciertas clases de contaminantes de agua, especialmente aquellos que no son fácilmente biodegradables.

Una gran variedad de microorganismos incluyendo algas, levaduras y hongos son capaces de remover con alta eficiencia una amplia variedad de colorantes y su eliminación resulta ser una tecnología barata en aguas residuales¹².

La capacidad de sorción es definida como la cantidad en mg de sorbato por gramo de sorbente. La capacidad de adsorción puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$q_t = \frac{(C_i - C_f)V}{W} \quad (1)$$

donde:

C_i = Concentración inicial de la disolución de colorante (ppm)

C_f = Concentración final de la disolución de colorante (ppm)

V = Volumen de la disolución de colorante (L)

W = Cantidad de biomasa (g)

q_t = Capacidad de adsorción en un tiempo determinado (mg/g).

1.3.2 *Isotermas de adsorción*

La relación entre la cantidad de sustancia adsorbida por un adsorbente y la concentración de equilibrio a una temperatura constante se denomina isoterma de adsorción.

Estas pueden ser agrupadas en cinco tipos mostrados en la figura 2.

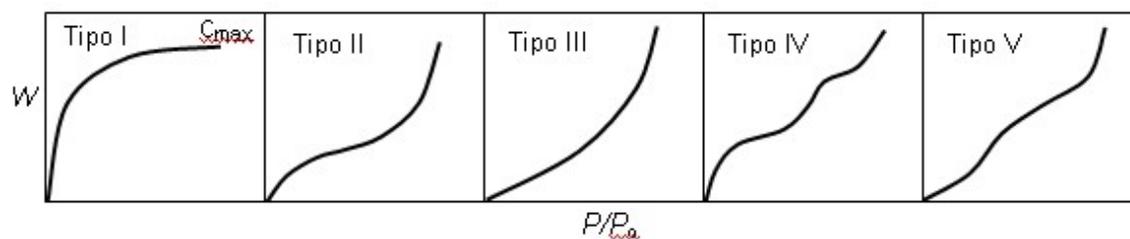


Figura 2. Tipos de isotermas

El tipo I es la isoterma de Langmuir y la presentan sólidos microporosos. La parte plana representa el llenado completo de estos poros por el gas condensado.

El tipo II es el más frecuente y ocurre en sólidos no porosos o en sólidos con diámetro de poro más grandes que los microporos. La parte plana de la curva se toma generalmente como la presión relativa a la cual se forma una monocapa del gas sobre la superficie, el final de la isoterma indica la formación de más capas. El calor de adsorción es mayor que el calor de licuefacción del gas.

El tipo III implica que el calor de adsorción es menor que el de licuefacción del adsorbato, lo que causa interacción del adsorbato con la primera capa adsorbida, es decir, se da una fuerte interacción adsorbato-adsorbato en lugar de adsorbato-adsorbente.

El tipo IV está asociado a la condensación capilar en los mesoporos, indicada por la parte plana de la curva a presiones relativamente altas. La parte inicial de la isoterma sigue el mismo comportamiento de la isoterma tipo II. A bajas temperaturas las moléculas del adsorbato se depositan en la superficie de los microporos y a medida que se incrementa la presión, las moléculas del adsorbato forman una monocapa sobre la superficie del sólido. La formación de multicapas del adsorbato sobre el sólido se ajusta a la ecuación BET. (Brunauer-Emmett-Teller). Ecuación para la adsorción multimolecular. La isoterma BET es una extensión del argumento de Langmuir.

El tipo V resulta de una interacción adsorbato-adsorbente débil y se presenta en poros mayores que los microporos, en el intervalo de los mesoporos.

Las isotermas que se adaptan al proceso de biosorción, son de Tipo I y Tipo II. En el caso de tratarse de adsorción química pura (Tipo I), la gráfica tiende asintóticamente a un límite, correspondiente a la cantidad adsorbida máxima ($C_{m\acute{a}x}$), el llamado límite de adsorción, independiente de la concentración. En una adsorción física pura no existe este límite y la cantidad adsorbida aumenta de forma continua con la concentración. En las situaciones intermedias se alcanza un cierto límite a concentraciones moderadas, donde tiene lugar la adsorción química en una monocapa, para posteriormente incrementarse la adsorción sin límite a concentraciones más altas, debido a la superposición de multicapas en fisisorción (Tipo II).

Los tres modelos matemáticos más utilizados para interpretar una isoterma de adsorción son Langmuir, Freundlich y Temkin, estos modelos utilizan parámetros que reflejan y evalúan la naturaleza del bioadsorbente y son de gran utilidad para poder comparar el rendimiento del proceso de bioadsorción⁴⁷.

1.3.2.1 *Isoterma de Langmuir*

La isoterma de Langmuir es a menudo usada para describir la sorción de solutos de soluciones líquidas y está expresada por la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (2)$$

donde:

q_e = Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)

q_{\max} = Capacidad máxima de adsorción (mg/g)

b = Parámetro que representa la afinidad de la biomasa por el contaminante o fuerza de unión biomasa-contaminante (L/mg)

C_e = Concentración en el equilibrio (ppm)

El parámetro q_{\max} representa la capacidad máxima de adsorción de la biomasa por el colorante y b refleja la afinidad del bioadsorbente por el contaminante.

Este modelo matemático se utiliza en su forma lineal para el tratamiento de los datos experimentales:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m b} + \frac{C_e}{q_m} \quad (3)$$

1.3.2.2 *Isoterma de Freundlich*

Una de las isotermas empíricas más utilizadas es la propuesta por Freundlich a finales del siglo XIX, y se encuentra expresada en la siguiente ecuación:

$$q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (4)$$

donde:

q_e = Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g)

C_e = Concentración en el equilibrio (ppm)

K_f = Constante de Frundlich (mg/g)/(L/g)ⁿ

n = Parámetro que representa la afinidad de la biomasa por el contaminante

La ecuación de Freundlich se utiliza en su forma lineal para el análisis de los datos experimentales:

$$\ln q_e = \frac{1}{n} \ln C_e + \ln K_f \quad (5)$$

1.3.2.3 *Isoterma de Temkin*

Temkim y Pyzhev consideran el efecto de algunas interacciones indirectas adsorbato-adsorbente sobre la isoterma de adsorción. Esta isoterma asume que el calor de adsorción de todas las moléculas en una capa disminuye linealmente con el recubrimiento del adsorbente, debido a las interacciones adsorbato-adsorbato. Esta adsorción se caracteriza por una distribución uniforme de energías de enlace⁴⁸.

La isoterma de Temkin tiene la siguiente forma:

$$q_e = \frac{RT}{b} [\ln(AC_e)] \quad (6)$$

La ecuación anterior puede ser expresada en su forma lineal como:

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad (7)$$

donde:

$$B = RT/b$$

T = Temperatura absoluta en K

R = Constante universal de los gases

A = Constante de equilibrio de enlace

B = Constante relacionada con el calor de adsorción

1.4 Cinética de biosorción

La cinética de biosorción estudia el comportamiento de adsorción en función de la velocidad y maneja los datos experimentales que representen el mejor modelo cinético. Existen muchos modelos cinéticos para entender el comportamiento del adsorbente y estudiar el mecanismo de control del proceso de la adsorción.⁴⁹ El diseño, estudio, análisis, operación y control cinético del proceso de bioadsorción es de amplio uso para la determinación del modelo cinético a fin de explicar el mecanismo de adsorción. Los bioensayos cinéticos describen el tiempo necesario en el que el sistema llega al equilibrio⁴⁸.

Los modelos cinéticos de primer y segundo orden son aplicados para distintos sistemas de biosorción. Cuando estos modelos intentan describir el proceso de biosorción basado en la capacidad adsorbente, son llamados modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden⁴⁹.

1.4.1 *Modelo cinético de pseudo primer orden*

Lagergren propuso un método de análisis de adsorción de pseudo primer orden obteniendo la ecuación cinética en la forma⁵⁰.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (8)$$

donde:

q_e = Cantidad de colorante adsorbido en el equilibrio (mg/g)

q_t = Cantidad de colorante adsorbido en el equilibrio a cualquier tiempo (mg/g)

k_1 = Constante de velocidad de pseudo primer orden (min^{-1})

La forma integral de la ecuación anterior con $q_t = 0$ y $t = 0$ conduce a:

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad (9)$$

1.4.2 *Modelo cinético de pseudo segundo orden*

Este modelo fue propuesto por Blanchard. La ecuación de pseudo segundo orden basado en el equilibrio de adsorción es expresada en su forma cinética con la siguiente ecuación⁵¹.

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (10)$$

Y su forma integral es la siguiente:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (11)$$

donde:

q_t = cantidad de colorante adsorbida en cualquier tiempo (mg/g)

q_e = cantidad de colorante adsorbida en el equilibrio (mg/g)

k_2 = Constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden
[g/(mg.min)]

t = Tiempo (min)

En la presente investigación se aplicarán estas herramientas matemáticas para evaluar la remoción de azul de metileno utilizando levadura de panadería a fin de determinar su eficiencia y capacidad biosorbente.

1.5 Hipótesis

La levadura de pan (*Saccharomyces cerevisiae*) remueve el azul de metileno de disoluciones acuosas sintéticas, el cual puede ser recuperado.

1.6 Objetivo general

Evaluar la capacidad de la levadura de pan (biomasa de *Saccharomyces cerevisiae*) para la remoción de azul de metileno a partir de una solución sintética y la eficiencia de su recuperación.

1.7 Objetivos particulares

- Evaluar el efecto del pH, la temperatura y concentración de biomasa sobre la remoción del colorante.
- Determinar la cinética de biosorción.
- Elaborar las isotermas de adsorción
- Calcular los parámetros fisicoquímicos de la biosorción
- Evaluar la recuperación del colorante

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Experimentos de biosorción

Se preparó una solución stock de colorante de AM con una concentración de 500 ppm, la cual se diluyó posteriormente de acuerdo a las condiciones experimentales.

Los experimentos preliminares de sorción se efectuaron poniendo en contacto 10 mL de solución 50 ppm de colorante azul de metileno, con biomasa deshidratada (*Saccharomyces cerevisiae*) como sorbente en tubos de ensayo.

Los tubos fueron tapados para prevenir evaporación y contaminación y luego colocados en un baño de temperatura con agitación (Poly Science, Dual Action Shaker) a una velocidad de 150 rpm.

El sorbente se separó de la solución a un determinado tiempo. La absorbancia de la solución sobrenadante se midió a una longitud de onda de 652 nm para determinar la concentración de colorante residual y se calculó el porcentaje de colorante removido. Una vez comprobado que la levadura de pan removía el colorante se procedió a determinar las condiciones experimentales más favorables para el proceso.

2.2 Determinación de las condiciones de biosorción

El efecto de la temperatura, la concentración de biomasa y el pH inicial fueron estudiados. El pH inicial se ajustó con HCl y NaOH en un medidor de pH Thermo Electron, Orion 3 Star Benchtop.

Se aplicó un diseño de experimentos factorial 3^3 , con tres variables y tres niveles, los que se muestran en la Tabla III.

TABLA III
DISEÑO DE EXPERIMENTOS 3^3

Concentración de biomasa (g/L)	pH	Temperatura (° C)
2.0	5	25
		35
		50
	7	25
		35
		50
	10	25
		35
		50
3.0	5	25
		35
		50
	7	25
		35
		50
	10	25
		35
		50
4.0	5	25
		35
		50
	7	25
		35
		50
	10	25
		35
		50

Para determinar las condiciones de sorción se colocó en un tubo de ensayo 10 mL la solución de AM con una concentración de 50 ppm. Cada disolución se ajustó a los diferentes pH del intervalo a utilizar (5, 7 y 10) con HCl ó NaOH 0.01N. A cada tubo se agregó la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* en diferentes cantidades (2, 3 y 4 g/L), usando una balanza analítica Sartorius R 300 S.

Los tubos se mantuvieron en agitación a 150 rpm durante 2 h y se corrieron experimentos a las temperaturas de 25 ° C, 35 ° C y 50 ° C. Después se separó la biomasa de la disolución de azul de metileno y el decantado fue analizado por la técnica de espectrofotometría UV-VIS, utilizando un espectrofotómetro (VARIAN, CARY 100 EL04083769) a una longitud de onda 652 nm. Con los resultados obtenidos se calculó la capacidad de sorción y la eficiencia de la remoción (% de remoción) en cada experimento.

Se realizaron tres réplicas de cada experimento y se efectuó un análisis estadístico de los resultados mediante un análisis de varianza ANOVA.

2.3 Determinación de la cinética de biosorción

Los experimentos de la cinética de adsorción del colorante azul de metileno se realizaron tomando en cuenta las mejores condiciones de biosorción determinadas en el punto anterior.

Se colocaron 0.02 g de biomasa en un tubo de ensayo con 10 mL de la solución de azul de metileno de concentración de 50 ppm previamente ajustada a un pH de 5. Los tubos de ensayo de los experimentos se mantuvieron en agitación a 150 rpm y a una temperatura constante de 25 °C. Se tomaron muestras a diferentes intervalos de tiempo (0.17, 0.33, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 40, 80 y 120 minutos). Después se separó la biomasa de la disolución de azul de metileno. Las disoluciones resultantes fueron analizadas por espectrofotometría UV-Visible a una $\lambda = 652$ nm. Se realizaron tres réplicas de cada experimento.

Con los resultados obtenidos se calculó la capacidad de sorción de la biomasa, así como la velocidad de la remoción y tiempo de equilibrio.

2.4 Elaboración de las isotermas de adsorción

Se prepararon disoluciones del colorante de 10, 50, 100, 200, 300, 400 y 500 ppm a pH 5, posteriormente se pusieron en contacto 10 mL de dichas soluciones con 0.02 g de biomasa a una temperatura de 25 ° C; se colocaron en agitación constante a 150 rpm, durante 120 minutos. En seguida se separó la biomasa de la mezcla de reacción y la disolución residual se analizó por espectrofotometría UV-Visible a $\lambda = 652$ nm. Cada experimento se realizó por triplicado.

Con los resultados se elaboraron las isotermas experimentales de adsorción, de las cuales se determinaron la q_{\max} (mg/g) y la afinidad del biosorbente por el contaminante.

2.5 Elución del colorante azul de metileno

Los ensayos de desorción del colorante AM se realizaron a partir de la biomasa con colorante obtenida de los experimentos de biosorción. La biomasa con colorante se puso en contacto con 10 mL de una disolución acuosa de HCl 0.1 M y se mantuvo en agitación constante durante 120 minutos. Después se separó la biomasa de la solución por medio de una filtración y se determinó la concentración del AM en el filtrado por espectrofotometría UV-Visible a $\lambda = 652$ nm.

Se calculó el porcentaje de elución por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ desorción} = \frac{C_f}{C_i} \times 100 \quad (12)$$

donde:

C_f = Concentración del colorante AM en el equilibrio de desorción

C_i = Concentración del colorante AM sorbida

2.6 Disposición de los residuos generados

Los residuos generados en el presente trabajo se dispusieron de acuerdo a lo especificado en el reglamento de los laboratorios y de seguridad e higiene de la Facultad de Ciencias Químicas, en contenedores correspondientes (colorantes y basura industrial).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Determinación de las condiciones de biosorción de AM

Los resultados del experimento de biosorción son mostrados en la tabla IV, las variables a analizar fueron el pH, la temperatura y la concentración de biomasa de la levadura.

TABLA IV
EFFECTO DE LAS VARIABLES EN LA BIOSORCIÓN DE AM

FACTORES			RESPUESTA	
Conc. de biomasa (g/L) A	Temperatura (°C) B	pH C	% Remoción	q (mg/g)
2	25	5	85.25	21.00
		7	80.10	19.73
		10	66.00	16.34
	35	5	65.70	16.26
		7	73.30	18.33
		10	70.50	17.36
	50	5	66.93	16.57
		7	68.00	16.83
		10	68.40	16.93
3	25	5	73.00	12.06
		7	69.47	11.43
		10	71.00	11.79
	35	5	63.50	10.93
		7	64.20	10.59
		10	69.70	11.58
	50	5	59.80	9.90
		7	61.70	10.18
		10	67.60	11.16
4	25	5	70.33	8.73
		7	74.40	9.23
		10	73.03	9.18
	35	5	62.70	7.80
		7	63.00	7.82
		10	70.07	8.71
	50	5	54.80	6.82
		7	54.27	6.75
		10	71.00	8.81

Se utilizaron tres niveles para conformar un diseño de experimentos factorial 3^3 , con ello fueron encontrados los parámetros que favorecieron el proceso de remoción del azul de metileno, determinándose la capacidad de sorción del biosorbente, así como el porcentaje de remoción del colorante.

La tabla IV revela que todas las variables en estudio afectan la capacidad de sorción. La más alta capacidad de sorción obtenida usando una disolución de concentración de 50ppm fue de 21 mg/g, que corresponde a una eficiencia de 85.25 % de remoción. Este porcentaje de remoción se alcanzó cuando se experimentó con una concentración de biomasa de 2 g/L, a una temperatura de 25 ° C y a un pH de 5.

La pared celular presenta diferentes grupos funcionales, que le confieren características que favorecen la interacción con otros grupos funcionales de carga contraria, tal es el caso de los colorantes catiónicos, como el azul de metileno, el que es atraído por los componentes de la pared de la levadura.

Se logra apreciar en la tabla IV que conforme se aumenta la concentración de la levadura, por lo general los porcentajes de remoción disminuyen; de igual forma ocurrió cuando la temperatura y pH se incrementaron.

La concentración de biomasa es una variable muy importante a considerar en el proceso de biosorción. En esta investigación se encontró que al aumentar la concentración de biomasa, el porcentaje de remoción y la capacidad de biosorción disminuyeron. Estos resultados sugieren que este efecto puede deberse a que ocurren interacciones electrostáticas entre los componentes de la superficie celular y a medida que aumenta la cantidad de biomasa las partículas tienden a aglomerarse, lo que provoca una disminución del área de contacto y por lo tanto disminuye la disponibilidad de sitios de unión de la biomasa con el colorante. Lo anterior coincide con las investigaciones

realizadas por Farah J.Y., *et al*, (2007), quienes atribuyen la disminución de la remoción de azul de antrazona con levadura de pan a la interferencia entre los sitios de unión biomasa- colorante, al aumentar la concentración de biomasa¹². Por otro lado, Mahmoud A.K., (2008) en experimentos realizados con biomasa de *Aspergillus niger* y *Spirogyra sp*, para la remoción de colorantes textiles, menciona que el incremento de biomasa favorece la remoción hasta determinado nivel, después de este nivel el efecto es desfavorable⁵².

En relación al pH se observa un efecto similar, al aumentar el pH disminuye el porcentaje y la capacidad de remoción, esto puede explicarse en términos de atracción electrostática entre la superficie de la biomasa y las moléculas del colorante. El azul de metileno es un colorante catiónico que es atraído por la superficie cargada negativamente de la biomasa⁵³.

Así mismo en esta investigación se observó que la biomasa pierde eficiencia y capacidad de remoción de azul de metileno al incrementar la temperatura arriba de los 30 °C. En estudios realizados con otros tipos de biomasa y colorantes se menciona un incremento en la biosorción al aumentar la temperatura en intervalos de 10-30 °C, mayores incrementos pueden alterar la superficie activa de la biomasa resultando una disminución de la capacidad de remoción. Lo anterior es indicativo de que el proceso es exotérmico. Esto también ha sido informado por O'Mahony, T. *et al*, 2002 y Ozer, A., G., Turabik, M. (2006), para la biosorción de negro remazol y azul ácido por *Rhizopus arrhizus* y *Spirogyra rhizopus* respectivamente^{27,41}.

3.1.1 **Análisis estadístico de los resultados del diseño de experimentos**

Para confirmar el efecto de las variables sobre la capacidad de remoción se realizó el análisis estadístico de los datos aplicando el Software *Design Expert*[®] Ver. 7.0.

Mediante un análisis de varianza realizado con los datos obtenidos del experimento, se logró estudiar el efecto que tienen las variables: concentración de biomasa, temperatura, pH y la interacción existente entre ellas con la capacidad de sorción. Los resultados de este análisis son mostrados en la tabla V.

TABLA V
ANÁLISIS DE VARIANZA

Fuente	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de cuadrados	Valor F	Valor p
A-Biomasa	1295.35	2	647.68	2946.21	< 0.0001
B-Temp.	47.23	2	23.61	107.41	< 0.0001
C-pH	0.13	2	0.065	0.30	0.7455
AB	5.02	4	1.26	5.71	0.0007
AC	20.01	4	5.00	22.75	< 0.0001
BC	23.30	4	5.83	26.50	< 0.0001
ABC	17.25	8	2.16	9.81	< 0.0001

En la tabla V se observa que el factor que más influyó en la capacidad de sorción de la levadura y de forma muy significativa es la concentración de biomasa, la variable que le continúa es la temperatura y enseguida la interacción existente (BC) entre la temperatura y el pH. Se observa que el factor que menos afectó en la variable de respuesta fue el pH, cuyo valor de F es el más bajo de 0.30.

La interacción entre las variables de concentración de biomasa y el pH en los tres niveles a 25 °C, es mostrada en la figura 3.

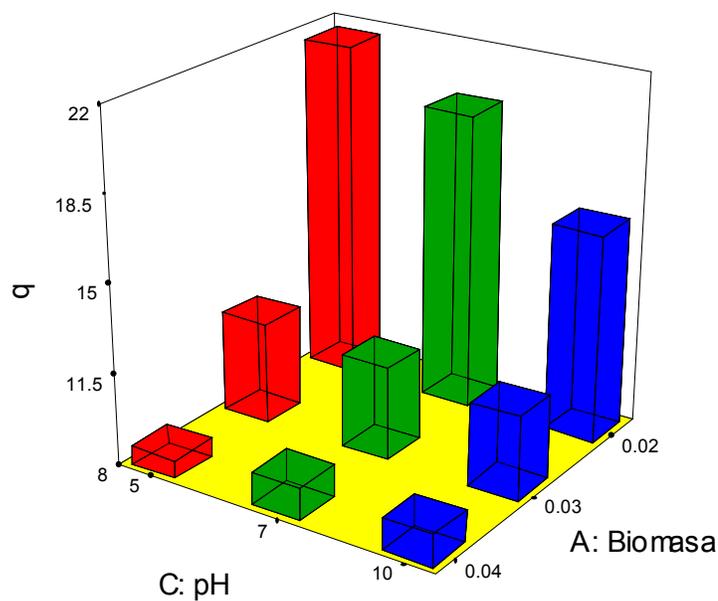


Figura 3. Influencia de la concentración de biomasa y el pH sobre la capacidad de sorción de la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* para remover AM a 25 °C

Al utilizar la levadura a una concentración de 0.02 g/10 mL, un pH de 5 y una temperatura de 25 °C se logró la mejor remoción del colorante con una capacidad de adsorción de 21.00 mg/g.

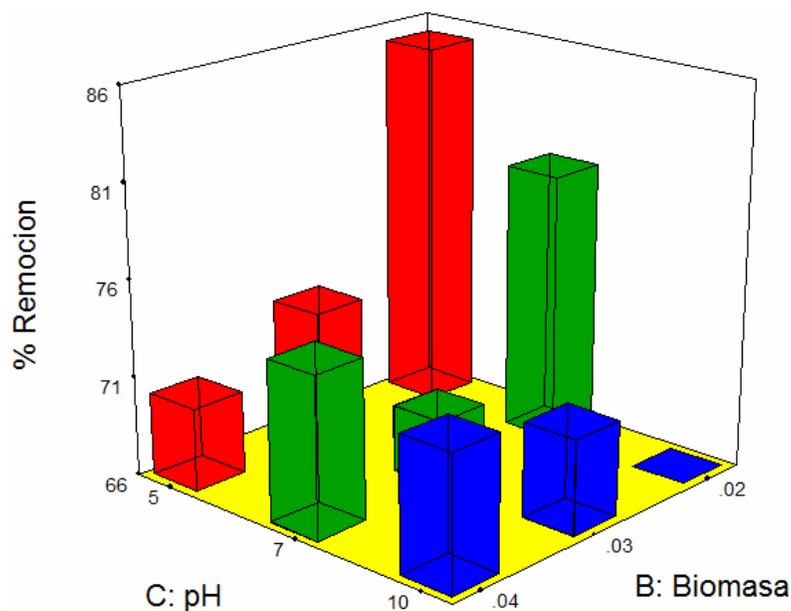


Figura 4. Influencia de la concentración de biomasa y el pH sobre el porcentaje de remoción de AM por la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* a 25 °C

En la figura 4, la interacción entre pH y biomasa son mostrados ahora en función del porcentaje de remoción, esto concuerda con los resultados de que la concentración de la biomasa tiene la mayor influencia en la remoción de AM.

La distribución normal de los resultados es otra prueba estadística donde se muestra el comportamiento normal de los resultados, y éstos están en función de la capacidad de adsorción, en la figura 5 los resultados representados por rombos se encuentran distribuidos muy cerca de la línea diagonal, lo que significa un comportamiento normal, es decir una distribución normal de los resultados.

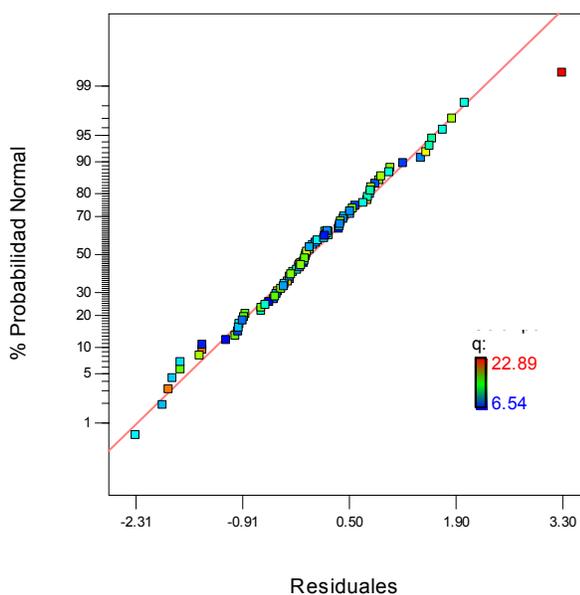


Figura 5. Distribución normal de los resultados

La tendencia que siguen los resultados experimentales con los predichos realizados automáticamente por el programa *Design Expert*[®] Ver. 7.0 son mostrados en la figura 6, la línea horizontal central representa el comportamiento ideal que el modelo debió seguir, es decir, los predichos, las líneas horizontales superior e inferior, indican los límites donde se encuentran los resultados reales. Se observa que de los 81 resultados, únicamente uno quedó fuera de los límites establecidos, pero esto no afectó la respuesta, puesto que los ensayos se desarrollaron por triplicado.

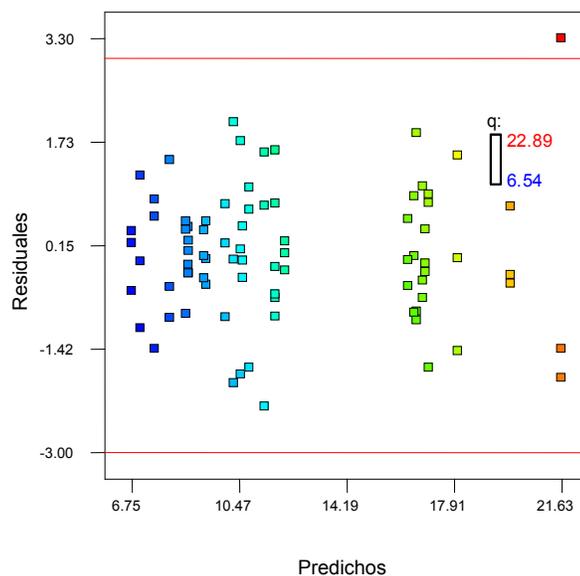


Figura 6. Comportamiento de los resultados experimentales con los predichos

3.1.2 Efecto del pH sobre la biosorción de Azul de Metileno

En la figura 7 se muestra el efecto del pH sobre la remoción de Azul de Metileno.

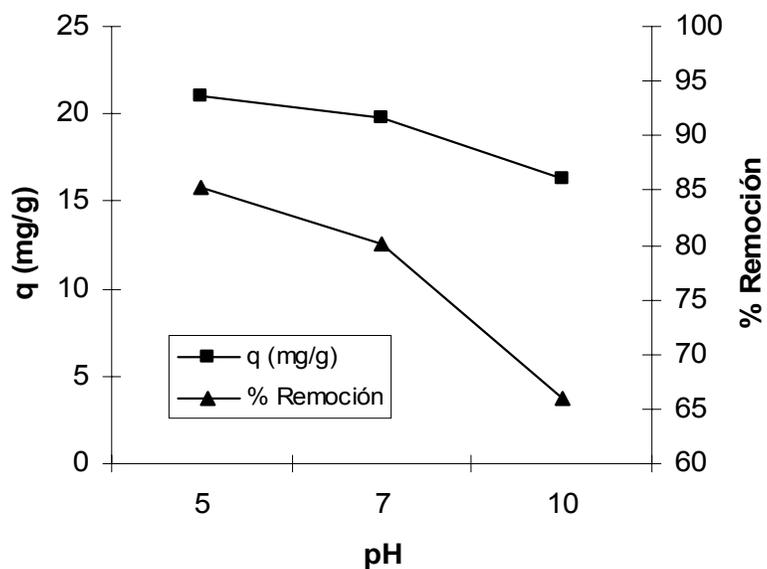


Figura 7. Efecto del pH sobre la remoción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de panadería a temperatura de 25 °C.

Se aprecia que la capacidad de sorción q (mg/g), a un pH de 5 es de 21.00 mg/g (85% de remoción) y para el pH neutro se obtuvo 19.73 mg/g (80.10 % de remoción), el valor de q disminuyó en 1.27 mg/g (4.90% de remoción). Se observó un cambio más notorio cuando se hizo el ensayo a un pH de 10, obteniendo la capacidad de sorción más baja de 16.34 mg/g (66% de remoción), cayendo el porcentaje de remoción en un 22% con respecto a la prueba a pH 5. Algunos investigadores han encontrado que la capacidad de sorción ha sido afectada notablemente, a pH inferiores a 4, como se muestran a continuación.

Runping H. *et al*, (2006) hicieron un estudio del efecto del pH en la adsorción del azul de metileno en partículas de hoja Phoenix; usaron 10 mL de AM 130 ppm con intervalos de pH de 2.5 a 10 y 2 g de biomasa de hojas. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: A pH 2.5 la capacidad de adsorción fue de 27 mg/g, a pH 4.5 mejoró el valor de q a 55 mg/g de AM removido y a valores más elevados de pH la variación fue mínima⁵⁴. Otros resultados fueron encontrados por Kumar K.V., Kumaran A (2005) quienes manejan intervalos de pH de 3 a 8 con 30 mL de AM 100 ppm y 0.02 g de semilla de mango en polvo. A pH de 3 la capacidad de adsorción fue de 8.55 mg/g, conforme se elevó el pH se incrementaron los valores de q , hasta obtener una adsorción de 109.8 mg/g a un pH de 8⁵⁵. Los resultados obtenidos por estos investigadores pueden deberse a que cuando el pH es muy bajo, la superficie del adsorbente se carga positivamente por la presencia los iones hidrógeno, los cuales compiten por los sitios de unión con el azul de metileno por el sorbente. A valores de pH mayores la superficie de la biomasa tiene mayor disponibilidad de grupos cargados negativamente con lo cual el colorante catiónico es atraído por las fuerzas electrostáticas de atracción⁵⁴.

3.1.3 Efecto de la temperatura sobre la biosorción de Azul de Metileno

En la figura 8 se muestra el efecto de la temperatura sobre la remoción de AM. Se observa que a una temperatura de 25 °C la capacidad de sorción fue de 21 mg/g (85% de remoción), teniendo un descenso a 16.26 mg/g (65.7% de remoción) con 35 °C, sin embargo el cambio que se presentó de 35 a 50 °C fue de 16.26 a 16.57 mg/g. (66.93% de remoción).

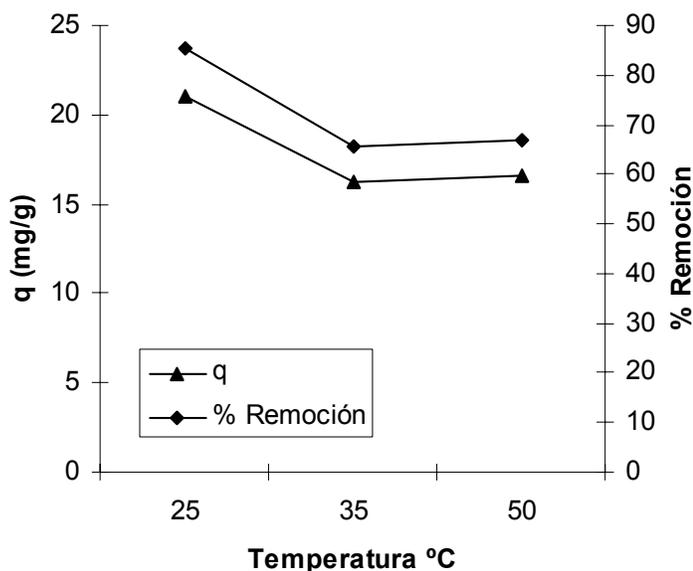


Figura 8. Efecto de la temperatura sobre la remoción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de panadería a pH 5.

El análisis de varianza demostró que la influencia de la temperatura en el proceso de sorción fue menor que el de la concentración de la biomasa, no obstante la temperatura afecta significativamente el proceso de remoción especialmente al incrementarla de 25 a 35 °C donde la remoción se redujo en un 22.7%.

Las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas así que la capacidad de adsorción incrementa cuando decrece la temperatura⁵⁶. El

decremento en la capacidad de biosorción a temperaturas elevadas se atribuye al daño en los sitios activos de unión con la biomasa⁵⁷.

Resultados similares fueron obtenidos por Mahmoud A. K. *et al.*, (2008) quienes probaron el efecto de diferentes temperaturas en la biosorción del colorante synazol por biomasa de *Aspergillus niger* y *Spirogyra sp.* El mejor porcentaje de remoción fue para el hongo con un 44% y para el alga un 36% a 30 °C mientras que a 45 °C los valores bajaron a un 14% y 10% respectivamente. Indicando que este proceso es exotérmico⁵².

3.1.4 Efecto de la concentración de biomasa sobre la biosorción de Azul de Metileno

En la figura 9 se muestra el efecto de la concentración de biomasa sobre la capacidad de remoción del colorante azul de metileno. Se observa que la capacidad de sorción aumentó al disminuir la concentración de biomasa de 3 a 2 g/L. con valores de q de 12.06 mg/g (73% de remoción) y 21.00 mg/g (85% de remoción) respectivamente, cuando la concentración de biomasa se elevó a 4 g/L, resultó en un valor de q de 8.73 (70.33 % de remoción).

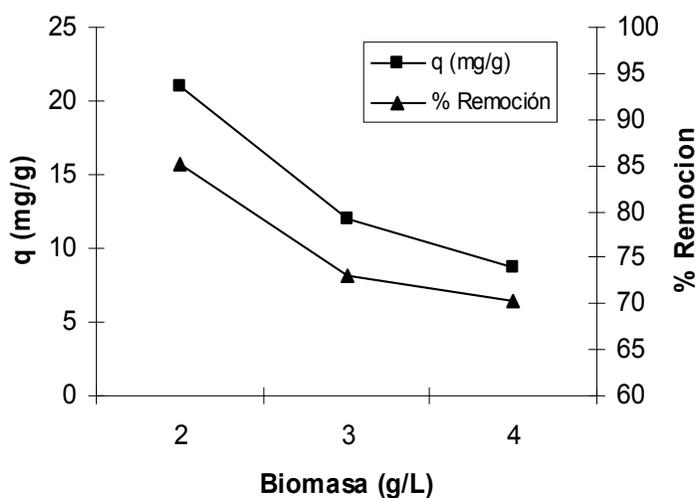


Figura 9. Efecto de la concentración de biomasa sobre la remoción de azul de metileno utilizando levadura de panadería a pH 5 y temperatura de 25 °C.

Un comportamiento parecido se observó en un trabajo realizado por Kumar K. V. y Porkodi K (2007), en donde se puso en contacto 30 ml de solución azul de metileno a una concentración de 100 ppm y a un pH de 8 con el hongo *Pasparum notatum* a diferentes cantidades (0.01 g hasta 0.08g)⁵⁸. La adsorción del colorante decreció de 33.6 mg/g a 18.34 mg/g al incrementar la concentración de la biomasa de 0.01 g a 0.08 g. Al aumentar la concentración de la biomasa causa un decremento en la cantidad de colorante que se removió por unidad de peso de biomasa, ya que a mayor número de microorganismos es menor la cantidad de colorante adsorbido por célula, esto produce una concentración de soluto más baja en la solución, cuando la concentración de la biomasa es más baja resulta en un efecto inverso.

Este efecto de gradiente de concentración entre el sorbato y el sorbente da explicación a los resultados obtenidos en esta investigación.

Los datos obtenidos del análisis de varianza y mostrados en la tabla V no dejan duda alguna de que la biomasa fue la principal variable que afectó la capacidad de sorción y precisamente los resultados de q que se acaban de ver confirman tal aseveración estadística.

Los resultados anteriores coinciden con lo reportado por Aksu Z., Çagatay, S., (2006), quienes señalan que la cantidad de biosorbente tiene gran influencia en la remoción de colorante donde bajas dosis de bioadsorbente, rinden altos porcentajes de remoción⁵⁹. Por otro lado también se menciona que un incremento de la cantidad de biomasa, generalmente incrementa la remoción, porque aumenta el número de sitios de unión del colorante a la biomasa, sin embargo a altas concentraciones de biomasa se pueden ocultar algunos de los sitios de unión²⁸, originando porcentajes de remoción más bajos. Esto sustenta los resultados de nuestro ensayo, mostrados en la figura 9.

3.2 Cinética de Biosorción

3.2.1 Cinética de Biosorción

Para el estudio y análisis cinético del proceso de remoción del colorante AM por la biomasa de *Saccharomyces cerevisiae* (levadura de panadería) se partió de las condiciones experimentales con mejor respuesta del diseño de experimentos factorial 3^3 : pH 7, temperatura 25 °C y concentración de biomasa 2 g/L.

En la figura 10 se presenta la gráfica de la cinética de remoción de azul de metileno utilizando levadura de panadería.

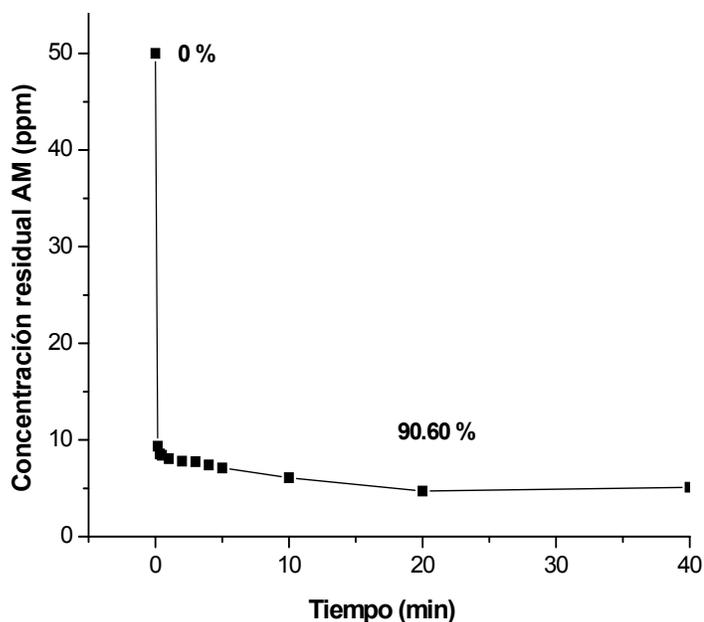


Figura 10. Variación de la concentración de azul de metileno de una disolución de 50 ppm, utilizando 2g/L de levadura de panadería a pH 5 y temperatura de 25 °C.

En la figura anterior se puede observar que la cinética de la biosorción muestra dos procesos: uno rápido, que ocurre en los primeros 5 minutos y otro lento que se efectúa entre los 5 a los 20 min. El primero ocurre debido a la gran área superficial de sorción de la biomasa, donde se forma una monocapa

que define el proceso cinético, en este período se remueve el 84.6% del colorante. En el segundo proceso la velocidad de remoción disminuye notablemente lo que puede indicar que el colorante se adsorbe formando otras capas sobre la ya existente y se llega a un equilibrio a los 20 minutos de contacto biomasa-colorante con una remoción de 90.6%.

Después de los 20 minutos no existe variación apreciable en la remoción del colorante, lo cual puede deberse a que se llega a una saturación de sitios de la biomasa a los que se une el colorante. El mayor porcentaje de remoción se alcanzó a los 120 min.

La figura 11 muestra la variación de la capacidad de sorción de azul de metileno por la biomasa respecto al tiempo.

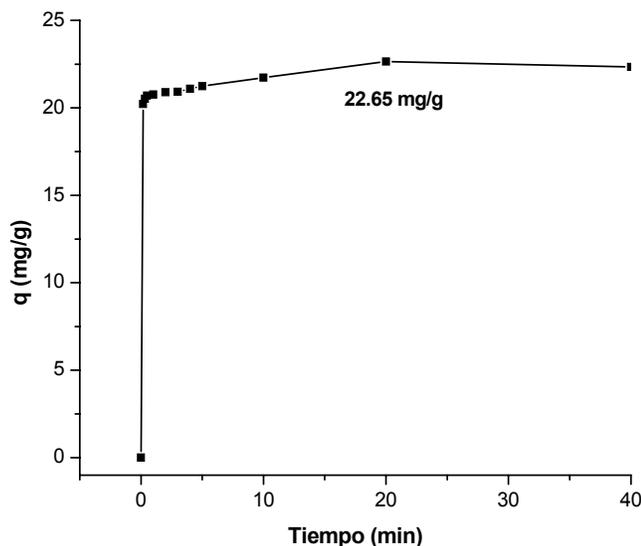


Figura 11. Variación de la capacidad de sorción de azul de metileno en una disolución de 50 ppm utilizando 2g/L de levadura de panadería a pH 5 y temperatura de 25 ° C.

La cinética muestra que en los primeros minutos se obtiene una muy buena capacidad de sorción, q igual a 21.24 mg/g, posterior a esto no se presenta un cambio significativo en los niveles de remoción, ya que la q

obtenida a los 20 y 120 minutos es de 22.65 mg/g y 22.77 mg/g respectivamente.

Nacera Y. y Aicha, B., (2006) obtuvieron un comportamiento muy parecido en la investigación que desarrollaron con *Streptomyces rimosus*, al ser removida la mayor cantidad de azul de metileno en los primeros 5 minutos, seguido de un proceso lento hasta alcanzar la concentración de equilibrio⁶⁰.

3.2.2 Modelo cinético de pseudo primer orden.

De acuerdo al modelo propuesto por Lagergren⁵⁰ (ecuación 8) y en base a la experimentación se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla VI para una reacción de pseudo primer orden:

TABLA VI.
RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN PARA UNA REACCIÓN DE PSEUDO PRIMER ORDEN.

t (min)	ln (1-q/qe)	q _{exp} (mg/g)	q _s (mg/g)	% error (q _{exp} vs q _s)
0	0	0	0	0
0,17	-2,190	20,22	-0,312	101,54
0,33	-2,314	20,52	-0,609	102,97
0,5	-2,396	20,70	-0,930	104,49
1	-2,426	20,76	-1,898	109,14
2	-2,494	20,89	-3,956	118,93
3	-2,508	20,92	-6,185	129,57
4	-2,606	21,09	-8,599	140,77
5	-2,698	21,24	-11,215	152,81
10	-3,088	21,73	-27,956	228,63

En la tabla VI se observa que para este orden de reacción, el ajuste de los datos experimentales genera un porcentaje de error mayor a un 100 % lo cual nos muestra una clara tendencia de que nuestro proceso no se ajusta al modelo de pseudo primer orden. Sin embargo y tomando en cuenta esto, se graficaron los datos de ln (1-q/qe) contra el tiempo (figura 12) para realizar una

regresión lineal y obtener la ecuación de la gráfica en donde la pendiente determinará los valores de la constante de velocidad K_1 (min^{-1}) para una reacción de pseudo primer orden.

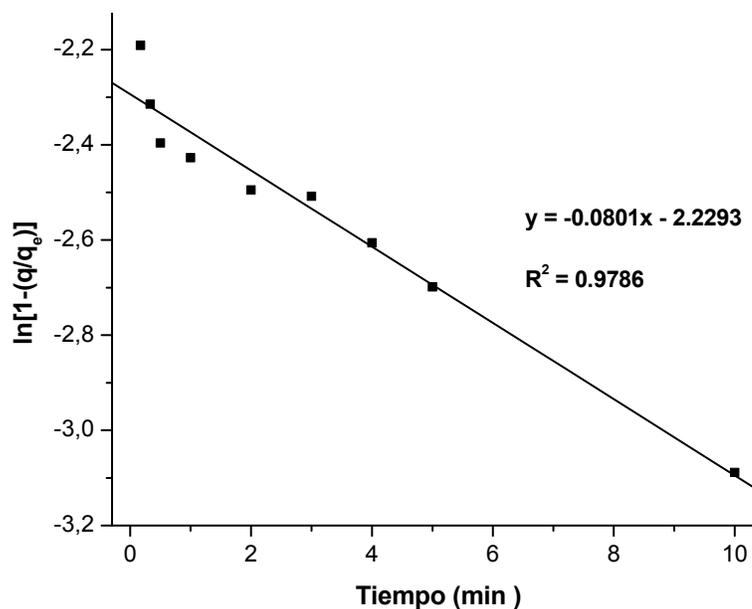


Figura 12. Gráfica de modelo de pseudo primer orden.

El modelo linealizado muestra un coeficiente de la correlación de 0.9786. Teniendo en cuenta el porcentaje de error y el factor de correlación se concluye que la cinética de remoción de azul de metileno utilizando levadura de panadería no se ajusta a una reacción de pseudo primer orden.

3.2.3 *Modelo cinético de pseudo segundo orden.*

De acuerdo al modelo propuesto por Blanchard⁵¹ (ecuación 10) y a la experimentación se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla VII.

TABLA VII.
RESULTADOS DE EXPERIMENTACIÓN PARA UNA REACCIÓN DE PSEUDO SEGUNDO ORDEN.

t (min)	t/q (min/(mg/g))	q _{exp} (mg/g)	q _s (mg/g)	% error (q _{exp} vs q _s)
0	0	0	0	0
0,17	0,008	20,22	17,302	14,44
0,33	0,016	20,52	19,581	4,57
0,5	0,024	20,70	20,559	0,66
1	0,048	20,76	21,607	4,08
2	0,096	20,89	22,172	6,12
3	0,143	20,92	22,367	6,93
4	0,190	21,09	22,465	6,52
5	0,235	21,24	22,525	6,06
10	0,460	21,73	22,645	4,19
20	0,883	22,65	22,706	0,24
40	1,791	22,34	22,736	1,78
80	3,575	22,38	22,752	1,67
120	5,270	22,77	22,757	0,06

A diferencia de los datos mostrados en la tabla VI para una reacción de pseudo primer orden, en la tabla VII se observa que los porcentajes de error no exceden el valor de 15 y el promedio de estos es de 4.4180. Tomando en cuenta que el promedio del porcentaje de error es mucho menor que en el modelo anterior, se concluye que el proceso de biosorción de azul de metileno tiene un mejor ajuste a una reacción de pseudo segundo orden.

Graficando los datos de t/q contra el tiempo (figura 13) para realizar una regresión lineal y con ello obtener la ecuación de la gráfica en donde la pendiente determinará los valores de la constante de velocidad K_2 para una reacción de pseudo segundo orden.

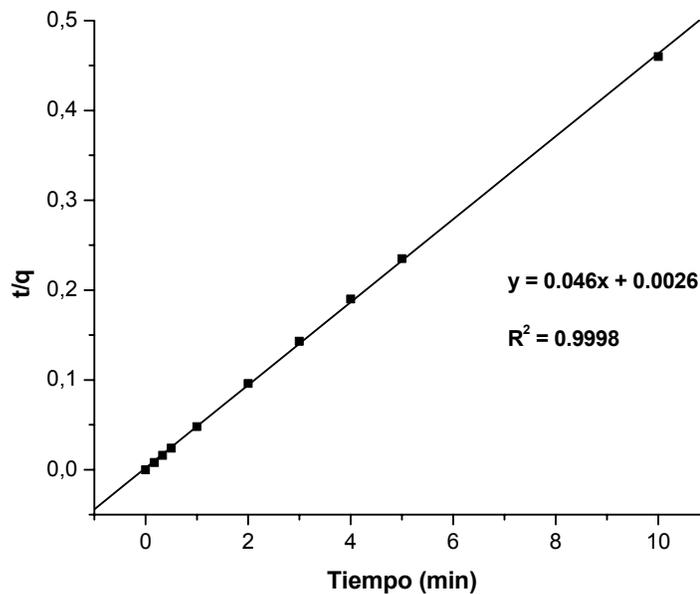


Figura 13. Gráfica de modelo de pseudo segundo orden.

En la figura 13 se observa que el valor de correlación es muy cercano a uno, lo que quiere decir que la ecuación se ajusta casi en su totalidad a la línea de los datos obtenidos experimentalmente. El valor de la constante de velocidad de adsorción obtenida fue de 0.8174 [g/(mg.min)]. Posteriormente se graficó el tiempo contra la q simulada y la q experimental (Figura 14), y se observa que la tendencia que siguen es muy similar, lo cual indica que el porcentaje de error es muy pequeño. En conclusión, la remoción de azul de metileno utilizando levadura de panadería es una reacción de pseudo segundo orden.

Mohan V.S., *et al.*,(2007) reportaron que la cinética de sorción de azo-colorantes se ajustaba a una reacción de segundo orden⁵³. Otros resultados similares al obtenido en la presente investigación son los reportados por Cengiz S. y Cavas L., (2007) para la remoción de azul de metileno con biomasa de algas⁶¹ y Hameed B.H., *et al.*, (2007) para la remoción de colorantes básicos con cáscara de pomelo⁶².

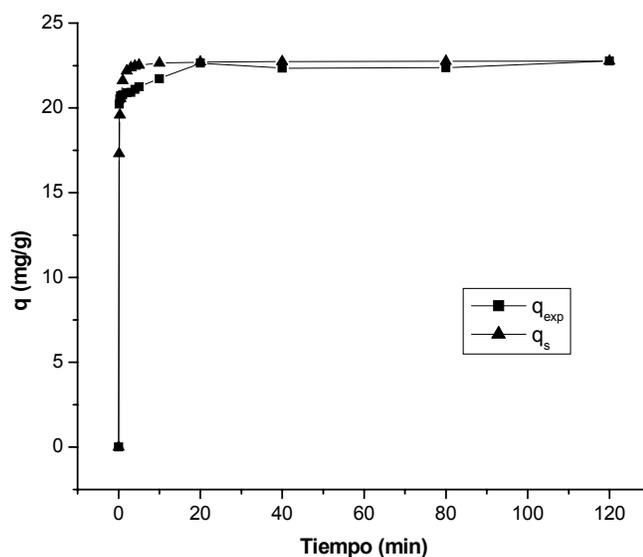


Figura 14. Comparación de los datos de capacidad de adsorción experimental con los simulados.

3.3 Isotermas de adsorción

3.3.1 *Isotermas de adsorción*

La tabla VIII, muestra los resultados de los bioensayos realizados a diferentes concentraciones iniciales de colorante.

TABLA VIII
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Conc. inicial de colorante (ppm)	Conc. residual de AM (ppm)	Capacidad de sorción q_{exp} (mg/g)
10	1.15	4.40
50	4.8	22.38
100	8.9	45.32
200	28.5	84.90
300	62.00	117.82
400	135.50	137.13
500	208.00	144.55

Los resultados de las isothermas experimentales de adsorción indican que al incrementar la concentración del colorante AM, aumenta la capacidad de adsorción en función de la cantidad de sitios de unión libres de la biomasa. El cambio de la pendiente de la curva indica saturación de la biomasa.

El proceso de biosorción del colorante es representado por una isoterma del Tipo I, es decir, se presenta una sorción química. En la figura 15 y 16 se muestra la isoterma de adsorción experimental y las simuladas con el modelo de Langmuir (ecuación 2) y de Freundlich (ecuación 3).

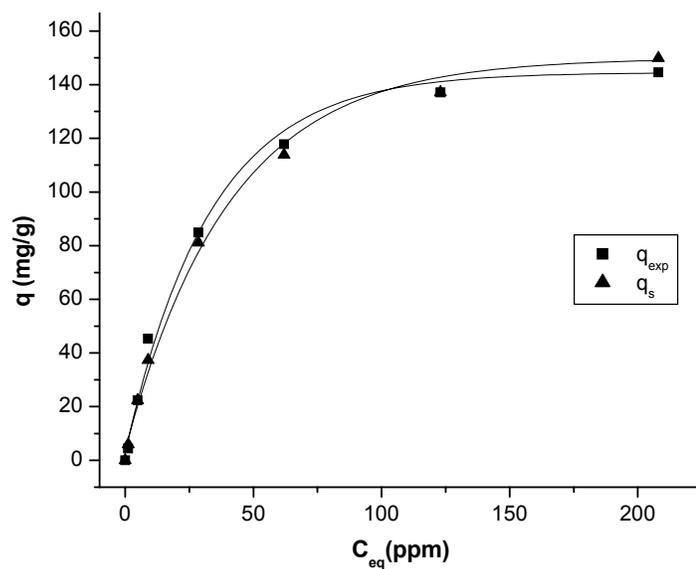


Figura 15. Comparación de isothermas de adsorción experimental y Langmuir (simulada) del azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.

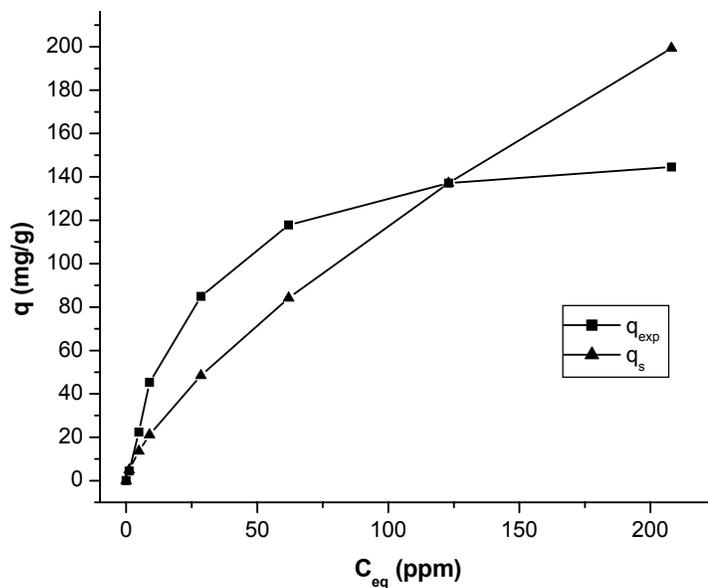


Figura 16. Comparación de isotermas de adsorción experimental y Freundlich (simulada) del azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.

Los datos experimentales fueron analizados con el modelo de Langmuir, se grafica C_{eq}/q contra C_{eq} (Fig. 17).

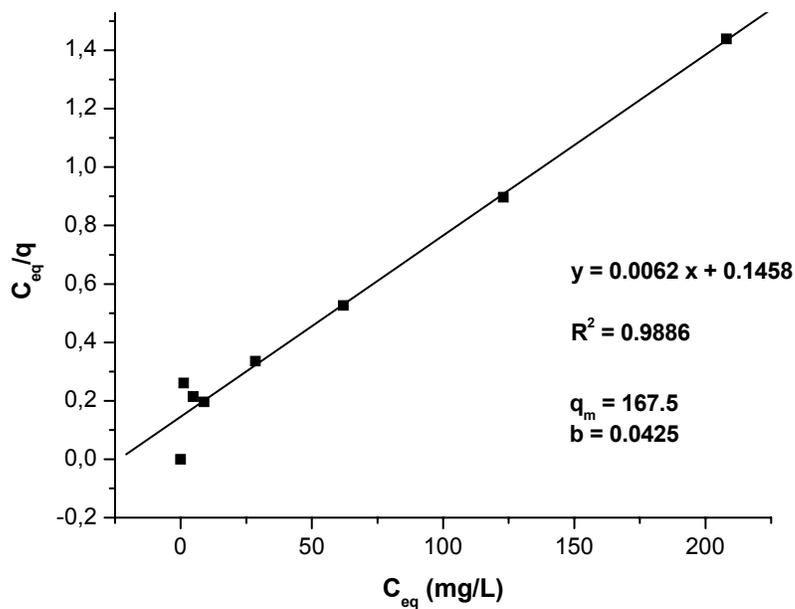


Figura 17. Modelo de Langmuir para la adsorción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.

Para obtener la ecuación de la recta realizando una regresión lineal, de donde la pendiente es $1/q_m$ y la intersección es $1/q_m b$ y mediante despejes se calculan los parámetros de q_m y b .

La capacidad máxima de remoción q_{max} para el modelo de Langmuir es de 167.5 mg/g.

Los datos experimentales también fueron analizados con el modelo de Freundlich, graficando $\ln q$ contra $\ln C_{eq}$ (Figura 18) para obtener la ecuación de la gráfica realizando una regresión lineal, de donde la pendiente es $1/n$ y la intersección es $\ln K_F$.

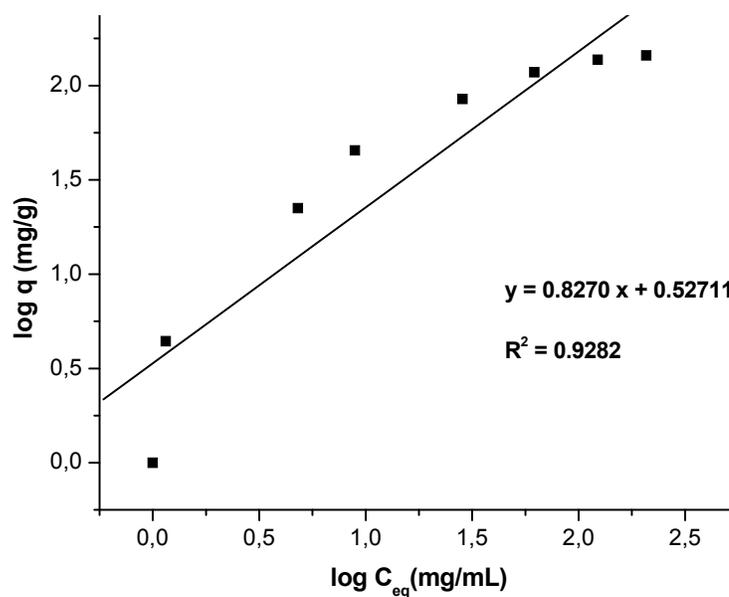


Figura 18. Modelo de Freundlich para la adsorción de azul de metileno utilizando 2g/L de levadura de pan a pH 5 y temperatura de 25 ° C.

En ambos modelos los coeficientes de correlación fueron calculados para estimar la exactitud con que se ajustan los puntos experimentales a una línea recta mediante una regresión lineal. La tabla IX muestra los parámetros evaluados para ambos modelos y sus coeficientes de correlación para realizar la comparación.

TABLA IX.
RESULTADOS DE LAS VARIABLES PARA LAS ECUACIONES DE
LANGMUIR Y FREUNDLICH.

Isoterma de Langmuir		
b (L/g)	(qm)teo (mg/g)	R²
0.0425	167.5	0.9775
Isoterma de Freundlich		
n	K_f (mg/g)/(L/g)ⁿ	R²
1.209	3.3659	0.9282

En esta tabla se puede comparar el valor del coeficiente de correlación entre Langmuir y Freundlich, se observa que el valor del primer modelo es muy cercano al uno con un 0.9775, mientras que el de Freundlich es de 0.9282; es decir que se encuentra demasiado desviado de los datos experimentales. Con estos resultados y con los porcentajes de error obtenidos al comparar los datos experimentales contra ambos modelos donde el % de error para el modelo de Langmuir fue de 9.16 y para el de Freundlich fue de 30.53, se concluye que el modelo de Langmuir es el que se ajustó mejor a los datos de las isotermas experimentales.

Han R., *et al*, (2006) investigaron la remoción del azul de metileno con cáscara de cereal y con sus resultados concluyeron que el proceso de biosorción se ajustaba mejor al modelo matemático de Langmuir⁴³.

Hameed B.H., *et al*, (2007) encontraron en sus resultados al trabajar con azul de metileno y cáscara de pomelo como biosorbente, que el fenómeno de biosorción también se ajustaba idóneamente al modelo de monocapa de Langmuir⁶².

La tabla X muestra un comparativo de la capacidad de remoción de diferentes biosorbentes de AM y el estudiado en este trabajo.

TABLA X
COMPARACIÓN DE LA CAPACIDAD MÁXIMA DE ADSORCIÓN DE DIFERENTES ADSORBENTES PARA LA REMOCIÓN DE AM

Adsorbente	q_{\max} (mg/g)	Referencias
Cáscara de cacahuete	161.3	Ozer <i>et al.</i> (2007) ⁶³
<i>Ulva lactuca</i>	40.2	El Sikaily <i>et al.</i> (2006) ⁶⁴
<i>Streptomyces rimosus</i>	34.3	Nacera y Aicha (2006) ⁶⁰
Caolín	14.0	Ghosh y Bhattacharyya (2002) ⁶⁵
<i>Posidonia oceanica</i>	5.56	Ncibi <i>et al.</i> (2007) ⁶⁶
Cenizas	3.1	Rao y Rao (2006) ⁶⁷
Polvo	32.26	D.S. De <i>et al.</i> (1998) ⁶⁸
Arcilla cruda	27.49	D. Ghosh <i>et al.</i> (2001) ⁶⁹
Arcilla calcinada	13.44	D. Ghosh <i>et al.</i> (2001) ⁶⁹
Cascarón de huevo	<1	W.T. Tsai <i>et al.</i> (2006) ⁷⁰
Levadura de pan	167.5	Este estudio

De la bibliografía revisada se observa que la levadura de panadería no ha sido reportada para la remoción de azul de metileno. Además al comparar la capacidad de la levadura de pan con la de otros biosorbentes utilizados para la remoción de este colorante, ésta muestra que es competente en capacidad y eficiencia.

Los parámetros de Langmuir, mostrados en la tabla IX, indican una gran capacidad de remoción ($q_{\max} = 167.5$) y una fuerza de unión débil por el colorante ($b = 0.0425$ L/g) lo que favorece la desorción. El parámetro de Freundlich da un valor de $n = 1.209$ lo que indica que el proceso es favorable, es decir que se presenta una buena afinidad entre colorante y el bioadsorbente³⁸.

3.4 Recuperación del colorante

El objetivo de la desorción es liberar al contaminante del bioadsorbente, para que el colorante y el bioadsorbente puedan ser reutilizados. Después de la desorción, el bioadsorbente conserva las características necesarias para remover nuevamente disoluciones de colorante.

Los porcentajes de desorción del colorante AM de la biomasa de levadura *Saccharomyces cerevisiae* fueron calculados de acuerdo con la ecuación 12. (ver página 25).

Los resultados de la elución se muestran en la tabla XI, donde se observa que los porcentajes de recuperación del colorante son semejantes aún y cuando la biomasa contenga diferente concentración. Se alcanzan un máximo de 74 % de recuperación del colorante, lo que puede indicar que en la biomasa no solo se presenta un fenómeno de adsorción, sino que el colorante pudiera ser absorbido hacia el interior de la célula. Para recuperarlo en su totalidad es necesario complementar el tratamiento.

TABLA XI

RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS DE DESORCIÓN DE AZUL DE METILENO DE LA BIOMASA DE *Saccharomyces cerevisiae*

Conc. retenida por biomasa (ppm)	Conc. de elución (ppm)	% Elución
238	157	66.0
277	195	70.0
292	217	74.0

En la literatura se reportan porcentajes de recuperación de colorantes muy variados, dependiendo de las condiciones experimentales, del biosorbente y colorante a remover, así lo muestran los ensayos realizados por Safaríkova M.

et al, 2004) quienes trabajaron con *Saccharomyces cerevisiae* y azul de anilina, obteniendo un 28% de recuperación cuando usaron de solvente al metanol, al utilizar metanol-NH₄OH (50:1, v/v) el porcentaje de elución fue de 55%¹³.

Por su parte Patel R. y Zurres S., (2008) obtuvieron un 95% de recuperación del colorante reactivo negro 5, desorbido del hongo *Aspergillus foetidus* mediante NaOH 0.1 N²⁵.

Aunque los porcentajes de recuperación del azul de metileno obtenidos en este trabajo no fueron del 100%, se observa una recuperación lo suficientemente redituable en su reuso y con posibilidades de hacer una optimización.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

1.- Se comprobó la eficiencia y rapidez de la biomasa de levadura de pan, *Saccharomyces cerevisiae*, para remover el colorante azul de metileno.

2.-Las condiciones que favorecieron la remoción del colorante fueron: pH 5, temperatura de 25°C y una concentración de biomasa de 2g/L siendo este último el factor que más afectó la capacidad de remoción.

3.-La cinética de remoción de azul de metileno puede ser explicada por un modelo cinético de pseudo segundo orden. Ésta se describe en dos etapas, una rápida, en los primeros 5 minutos y otra lenta, alcanzándose el equilibrio aproximadamente a los 20 minutos de contacto biomasa-colorante y logrando una eficiencia de remoción superior al 90%.

4.- Las isotermas de adsorción experimentales se ajustaron mejor al modelo de Langmuir. La biomasa de *S. cerevisiae* presentó una $q_{max.}=167.5\text{mg/g}$.

5.- La recuperación del colorante con ácido clorhídrico 0.1 M fue eficiente, y el porcentaje de elución de 70 % indica una buena expectativa para reutilizar tanto la biomasa como el colorante.

6.- La levadura de panadería presenta potencial para ser utilizada en tratamiento de efluentes de la industria textil.

CAPÍTULO 5

RECOMENDACIONES

1.- Evaluar el efecto que tienen otros contaminantes en la remoción del azul de metileno por *Saccharomyces cerevisiae*.

2.- Efectuar pruebas de biosorción con muestras reales, donde los efluentes industriales sean de origen heterogéneo, principalmente textil.

3.- Hacer ensayos donde se involucren otros colorantes y evaluar niveles diferentes de las variables utilizadas.

4.- Estimar la capacidad de biosorción de la levadura, después del tratamiento ácido para la recuperación del colorante.

5.- Estudiar en columna algunos bioensayos con muestras sintéticas y efluentes industriales.

6.- Desarrollar pequeñas pruebas de campo con la levadura en plantas de tratamientos de agua para influentes y/ó efluentes contaminados con AM.

7.- Optimizar el método de elución del colorante.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albanis, T.A., Hela, D.G., Sakelarides, T.M. Danis, T. G. Removal of dyes from aqueous solutions by adsorption on mixtures of fly ash and soil and batch and column techniques. *J. Global Nest*. 2(3), 237-244. **2000**.
2. Aksu, Z., Dönmez, G. A comparative study on the biosorption characteristics of some yeast for Remazol Blue reactive dye. *Chemosphere*. 50,1075– 83. **2003**.
3. Gulnaz, O., Kaya, A., Matyar, F., Arikan, B. Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge. *J. Hazard. Mater. B*, 108, 183-188. **2004**.
4. Aksu, Z. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: A review. *Procces Biochem*. 40, 997-1026. **2005**.
5. Crini, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. *Bioresource Technology*. 97,1061–1085. **2006**.
6. Banks, C.J., Parkinson, M.E. The mechanism and application of fungal biosorption to color removal from raw water. *J. Chem. Technol. Biotechnol*. 54, 192-196. **1992**.
7. Bhattacharyya, K.G., Sharma. A. Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on Neem (*Azadirachta indica*) leaf powder. *Dyes and Pigments*. 65, 51–59, **2005**.
8. Waranusantigul, P., Pokethitiyooka P., Kruatrachue, M., Upatham, E.S. Kinetics of basic dye (methylene blue) biosorption by giant duckweed (*Spirodela polyrrhiza*). *Environ. Pollut*. 125, 385–392. **2003**.
9. Gücek, A., Sener, S., Bilgen, S. Mazmanc'y M. Adsorption and kinetic studies of cationic and anionic dyes on pyrophyllite from aqueous solutions. *J. Colloid Interf. Sci*. 286, 53–60. **2005**.
10. Acemiocglu, B. Batch kinetic study of sorption of methylene blue by perlite. *J. Chem. Eng*. 106, 73–81. **2005**.
11. Bulut, Y., Aydin, H.A. kinetic and thermodynamic study of methylene blue adsorption on wheat shells. *Desalination*. 194, 259–267. **2006**.
12. Farah, J.Y., El-Gendy, N.S, Farahat, L.A. Biosorption of Astrazone Blue basic dye from an aqueous solution using dried biomass of Baker's yeast. *J. Hazard Mater*. 148, 402–8. **2007**.

13. Safaříková, M., Ptáčková, L., Kibriková, I., Šafařík, I. Biosorption of water-soluble dyes on magnetically modified *Saccharomyces cerevisiae* subsp. *uvarum* cells. *Chemosphere*. 59, 831-35. **2004**.
14. Chen, K., Wu, J., Huang, C., Liang, Y., Hwang, S. Decolorization of azo dye using PVA-immobilized microorganisms. *J. Biotechnol*, 101, 242–51. **2003**.
15. Rathinam, A., Jonnalagadda, R., Balachandran, U. Removal of basic yellow dye from aqueous solution by sorption on green alga *Caulerpa scalpelliformis*. *Biotechnol. Bioeng*. 32,453-460. **2007**.
16. Cervantes, F., Duong-Dac, T., Ivanova, A., Roest, K., Akkermans, A., Letinga G. Selective enrichment of *Geobacter sulfurreducens* from anaerobic granular sludge with quinones as terminal electron acceptors. *Biotechnol. Lett*. 25,39–45. **2003**.
17. Zee Van Der, F., Bouwman, R., Strip, B., Lettinga, G., Field, J. Application of redox mediators to accelerate the transformation of reactive azo dyes in anaerobic bioreactors. *Biotechnol. Bioeng*. 75, 691–701. **2003**.
18. Itho, K., Kitade, Y., Nakanishi, M., Yatome, C. Decolorization of methyl by a mixed culture of *Bacillus sp.* and *pseudomonas stutzeri*. *J. Environ. Sci*. 37,415-21. **2002**.
19. Sam, M., Yesilada, O. Decolorization of Orange II dye by white-rot fungi. *Folia Microbiol*. 46,143– 5. **2001**.
20. Lin, J., Lian, W., Xia, L., Cen, P. Production of laccase by *Coriolus versicolor* and its application in decolorization of dyestuffs: II. Decolorization of dyes by laccase containing fermentation broth with or without self-immobilized mycelia. *J. Environ. Sci*. 15,5–8. **2003**.
21. Blumel, S., Knackmuss, H.J., Stolz, A. Molecular cloning and characterization of the gene coding for the aerobic azoreductase from *Xenophilus azoborans* KF46F. *Appl. Environ. Microbiol*. 68, 3948-55. **2002**.
22. Maximo, C., Amorim, M., Costa-Ferreira, M. Biotransformation of industrial reactive azo dyes by *Geotrichum sp.* CCM1 1019. *Enzyme Microb. Technol*. 32,145– 51. **2003**.
23. Bhatt, M., Patel, M., Rawal, B., Novotny, C., Molitoris, H., Sasek, V. Biological decolorization of the synthetic dye RBBR in contaminated soil. *World J. Microbiol. Biotechnol*. 16,195–8. **2000**.

24. Kasinath, A., Novotny, C., Svobodova, K., Patel, K., Sasek, V. Decolorization of synthetic dyes by *Irpex lacteus* in liquid cultures and packed-bed bioreactor. *Enzyme Microb. Technol.* 32,167–73. **2003**.
25. Patel, R., Suresh, S. Kinetic and equilibrium studies on the biosorption of reactive black 5 dye by *Aspergillus foetidus*. *Bioresource Technology* 99, 51-58. **2008**.
26. Binupriya, A.R., Sathishkumar, M., Swaminathan, K., Yun, S.E. Comparative studies on removal of Congo red by native and modified mycelial pellets of *Trametes versicolor* in various reactor modes. *Bioresource Technology* 99, 1080-1088. **2008**.
27. O'Mahony, T., Guibal, E., Tobin, J.M. Reactive dye biosorption by *Rhizopus arrhizus* biomass. *Enzyme Microb. Technol.* 31,456–63. **2002**.
28. Wang, J.L. Biosorption of copper (II) by chemically modified biomass of *Saccharomyces cerevisiae*. *Process Biochem. b.* 37, 847–50. **2002**.
29. Aksu, Z.I., Isoglu, A. Use of agricultural waste sugar beet pulp for the removal of Gemazol turquoise blue-G reactive dye from aqueous solution. *Hazardous Materials B.* 137, 418-430. **2006**.
30. Tangaromsuk, J., Pokethitiyook, P., Kruatrachue, M., Upatham, E.S. Cadmium biosorption by *Sphingomonas paucimobilis* biomass. *Biores. Technol.*;85,103–5. **2002**.
31. Vítor, J.P., Vilar., Cidália, M.S. Botelho, Rui A.R. Boaventura. Methylene blue adsorption by algal biomass based materials: Biosorbents characterization and process behavior. *J. of Hazardous Materials* 147: 120-132. **2007**.
32. Aksu. Z., Tezer, S. Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. *Proc. Biochem.* 40,1347–1361. **2005**.
33. Fu, Y., Viraraghavan, T. Removal of C.I. acid blue 29 from an aqueous solution by *Aspergillus niger*. *Chem. Color. Rev.* 1,36–40. **2001**.
34. Fu, Y., Viraraghavan, T. Dye biosorption sites in *Aspergillus niger*. *Bioresour. Technol.* 82,139–145. **2002**.
35. Gavrilesca, M. Removal of heavy metals from the environmental by biosorption. *Eng. Life Sci.* 4, 219–32. **2004**.
36. Binupriya, A.R., Sathishkumar, M., Kavitha, D., Swaminathan, K., Yun, S.E. Aerated and rotated mode of decolorization of a textile dye solution by native and modified mycelial biomass of *Trametes versicolor*.. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 82, 350–9. **2007**.

37. Mishra, G. y Tripathy, M. A critical review of the treatment for decolourization of textile effluent. *Colourage*. 40, 35-38. **1993**
38. Volesky, B. Biosorption process simulation tools. *Hydrometallurgy*, 71(1-2), 179-190. **2003**.
39. Cañizares – Villanueva, R. Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*. 42, 41 - 251. **2000**.
40. Volesky, B. y Holan, Z.R. Biosorption of heavy metals. *Biotechnol. Progress* 11, 235-250. **1995**.
41. Ozer, A.G., Turabik, M. Biosorption of acid blue 290(AB 290) and acid blue 324 (AB 324) dyes on *Spirogyra rhizopus*. *J. of Hazardous Materials B*. 135,355-364. **2006**.
42. Senthilumaar, S., Kalaamani, P., Porkodi, K., Varadarajan, R.P., Subburaam, C.V. Adsorption of dissolved reactive red dye from aqueous phase onto activated carbon prepared from agricultural waste. *Bioresource Technology*. 97, 1618-1625. **2006**.
43. Han, R., Wang, Y., Han, P., Shi, J., Yang, J., Lu, Y. Removal of methylene blue from aqueous solution by chaff in batch mode. *J. of Hazardous Materials B*. 37,550-557. **2006**.
44. Pagga, U.M. and Taeger, K. Development of a method for adsorption of dyestuffs on activated sludge. *Water Resour.* 28, 1051-1057. **1994**.
45. Mendez, O., Menghi, C.I., Famiglietti, A. Propuesta de un fijador-colorante para el diagnóstico de *Trichomonas vaginalis*. *Acta Bioquímica Clín. Latinoam.* 34, 425-9. **2000**.
46. Manier, J. Slowing diseases mental ravages. Tribune Chicago. July **2008**.
47. Fuentes S. y Díaz G. Catalizadores: ¿La piedra filosofal del siglo XX?. Editorial FCE. **2000**.
48. Brunauer, S. Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea. Apuntes de química física avanzada, Departamento de química física. Universidad de València G. **2008**.
49. Ho, Y.S., McKay, G. Sorption of dye from aqueous solution by peat. *J. Chem. Eng.* 70, 115-124. **1998**.

50. Lagergren, S., Zur theorie der sogenannten adsorption gelöster stoffe, *Lungliga Svenska Vetenskapsakad. Handl.* 24:1-39. **1898**.
51. Blanchard, G., Maunaye, M., Martin, G. Removal of heavy metals from Waters by means of natural zeolites. *Water Res.* 18, 1501-1507. **1984**.
52. Mahmoud, A.K. Biosorption of reactive dye from textile wastewater by nonviable biomass of *Aspegillus niger* and *Spirogyra* sp. *Bioresource Technology.* 99, 6631-6634. **2008**.
53. Mohan, V.S., Ramanaiah, S.V., Sarma, P.N. Biosorption of direct azo dye from aqueous phase onto *Spirogyra* sp. 102: Evaluation of kinetics and mechanics aspects. *J. Biochem. Eng.* 38, 61-69. **2007**.
54. Runping, H., Weihua, Z., Weihony, Y. Biosorption of methylene blue from aqueous solution by fallen phoenix tree's leaves. *J. of Hazardous Materials.* 14, 156-257. **2006**.
55. Kumar, K.V., Kumaran, A. Removal of methylene blue by mango seed kernel powder. *J. of Biochemical Engineering.* 27, 83-93. **2005**.
56. Kapoor, A., Viraraghavan, T. Fungi as biosorption, In: Wase DAJ, Forster CF, editors. *Biosorbents for Metal Ions*. London, UK: Taylor and Francis; p. 67-85. **1997**.
57. Ozer, A. y Ozer, D. Comparative study of the Pb(II), Ni(II) and Cr(VI) ions onto *Saccharomyces cerevisiae*: determination of biosorption heats. *J. of Hazardous Materials B.* 100, 219-229. **2003**.
58. Kumar, K.V., Porkodi, K. Batch adsorbed for different solution volume/adsorbent mass ratio using the experimental equilibrium data with fixed solution volume/adsorbent mass ratio of malaquite green onto orange peel. *Dyes Pigments.* 74, 590–594. **2007**.
59. Aksu, Z., Çagatay, S. Investigation of biosorption of Gemazol Turquoise Blue G reactive dye by dried *Rhizopus arrhizus* in batch and continuous system. *Sep Purif Technol.* 48, 997-1026. **2006**.
60. Nacera, Y., Aicha, B. Equilibrium and kinetic modeling of methylene blue biosorption by pretreated dead *Streptomyces rimosus*: effect of temperature. *J. Chem. Eng.* 119, 121–125. **2006**.
61. Cengiz, S., Cavas, L. Removal of methylene blue by invasive marine seaweed: *Caulerpa racemosa* var. *Cylindracea*. *Bioresource. Technology.* 99, 2357-2363. **2007**.

62. Hameed, B.H., Mahmoud, D.K., Ahmad, A.L. Sorption of basic dye from aqueous solution by pomelo *Citrus grandis*? Peel in a batch system. *Colloids and surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.* 316, 78-84. **2007.**
63. Ozer, D., Dursan, G., Ozer, A. Methylene blue adsorption from aqueous solution by dehydrated peanut hull. *J. Hazard. Mater.* 144, 171-179. **2007.**
64. El Sikaily, A., Khaled, A., El Nemr, A., Abdelwahab, O. Removal of methylene blue from aqueous solution by marine green alga *Ulva lactuca*. *Chem. Ecol.* 22, 149–157. **2006.**
65. Ghosh, D., Bhattacharyya, K.G. Adsorption of methylene blue on kaolinite. *Appl. Clay Sci.* 20, 295–300. **2002.**
66. Ncibi, M.C., Mahjoub, B., Se.en, M. Kinetic and equilibrium studies of methylene blue biosorption by *Posidonia oceanica* (L.) fibres. *J. Hazard. Mater.* B139, 280–285. **2007.**
67. Rao, V.V.B., Rao, S.R.M. Adsorption studies on treatment of textile dyeing industrial effluent by yeast. *J. Chem. Eng.* 116, 77–84. **2006.**
68. De, D.S., Basu, J.K. Adsorption of methylene blue on to a low cost adsorbent developed from saw dust, *Indian. J. Environ. Prot.* 19, 416–421. **1998.**
69. Ghosh, D., Bhattacharyya, K.G. Removing color from aqueous medium by sorption on natural clay: a study with methylene blue, *Indian J. Environ. Prot.* 21, 903–910. **2001.**
70. Tsai, W.T., Yang, J.M., Lai, C.W., Cheng, Y.H., Lin, C.C., Yeh, C.W. Characterization and adsorption properties of eggshells and eggshell membrane. *Bioresource Technology.* 97, 488–493. **2006.**