



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA FÍSICA E ENXEÑERÍA QUÍMICA I

*Utilización de lodos rojos para la
eliminación de contaminantes en
efluentes de la industria textil*

Trabajo de Fin de Grado de Química presentado por:
Raquel Doval Leira

Agradecimientos

Me gustaría dar mi agradecimiento a varias personas que han hecho posible que este Trabajo Fin de Grado vea la luz.

En primer lugar a mi tutora Pilar Rodríguez Barro por su apoyo y por ayudarme a comenzar este camino, teniendo siempre un hueco para atenderme, gracias.

Al Departamento de Química Física e Ingeniería Química I y en especial a los integrantes del grupo de investigación Fisicoquímica de Aguas Naturales, por aportarme ideas, consejos y conocimientos que me ayudaron a estar más cerca de la finalización de este trabajo.

Por su interés y ayuda a mis compañeros, en especial a Verónica Castro y a David Ausín, pues sin su ayuda no se habría llegado a realizar este trabajo.

A mis padres por su apoyo y presencia incondicional.

Y finalmente, a Jorge por su paciencia y amor incondicional.

Gracias

Índice

1. Resumen.....	3
2. Introducción	9
2.1. Adsorción	9
2.2. Lodo rojo	10
2.2.1. Proceso Bayer.....	10
2.3. Colorantes	11
2.4. Modelos de equilibrio en los procesos de adsorción	12
2.4.1. Linealización de la isoterma	13
3. Parte Experimental	15
3.1. Adsorbato.....	15
3.2. Adsorbente	15
3.3. Adsorbente inmovilizado	16
3.4. Procedimiento experimental.....	17
3.4.1. Influencia del pH en la adsorción del azul ácido 25	17
3.4.2. Influencia de la cantidad de lodo rojo en la adsorción del ácido azul 25.....	17
3.4.3. Isoterma de adsorción	18
3.4.4. Estudio de la adsorción del lodo inmovilizado	18
3.5. Estudios cinéticos	18
4. Resultados y discusión	20
4.1. Estudios de equilibrio	20
4.1.1. Influencia del pH en la adsorción del azul ácido 25	20
4.1.2. Influencia de la cantidad de lodo rojo en la adsorción del ácido azul 25.....	21
4.1.3. Isotermas de adsorción.....	21
4.1.4. Estudio de la adsorción del lodo inmovilizado	25
4.2. Estudio cinético	25
4.2.1. Cinéticas de adsorción	25
5. Conclusiones	27
6. Bibliografía	31

1. Resumen

1. Resumen

Los colorantes sintéticos pueden existir en los efluentes de las aguas residuales de las distintas industrias, por ejemplo, textiles, del papel, cuero, plásticos, etc. La descarga de las aguas residuales de las industrias que usan colorantes en las corrientes naturales y ríos supone severos problemas ambientales. Incluso pequeñas cantidades de colorante pueden dar color a una gran masa de agua, lo que no solo afecta a los aspectos estéticos sino que también reduce la penetración de luz y, consecuentemente, la fotosíntesis de las plantas acuáticas. Adicionalmente, la mayor parte de los colorantes también son tóxicos o mutagénicos y cancerígenos. Por estos motivos, la eliminación de los colorantes de los efluentes residuales es una cuestión importante desde el punto de vista medioambiental.

Las plantas de tratamientos de residuos convencionales no son adecuadas para la eliminación de los colorantes debido a sus características no biodegradables. Es por ello que se han desarrollado métodos alternativos para la eliminación de los colorantes de las aguas residuales. Entre estos métodos cabe citar: la coagulación y la floculación, separación utilizando membranas, oxidación, electrocoagulación, y adsorción.

De estos métodos, la adsorción parece presentar el mejor potencial de todos los tratamientos ya que resulta muy eficaz a concentraciones bajas de contaminante. Aunque el carbón activo es el adsorbente más extensamente usado para el tratamiento de aguas residuales, es muy caro y tiene altos costos de operación debido al alto precio del carbón activo y a la alta velocidad de flujo del agua que implica. Estos costes pueden ser incrementados en gran manera cuando no hay unidades de regeneración del carbón activo en la zona. Como consecuencia de ello, en años recientes, se ha centrado la atención en el estudio de materiales de bajo coste para eliminar los contaminantes de la fase acuosa. Para eliminar los colorantes de las aguas residuales han aparecido un gran número de trabajos de investigación centrados en el estudio de la utilización de diversos materiales ⁽¹⁾, entre ellos perlita, biomateriales, lodo de aluminio reciclado, zeolitas, arcilla, bagazos, cenizas volantes, cascara de cacahuete, etc.

El lodo rojo (deshecho de la bauxita en la producción de aluminio) surge como un subproducto no deseado durante el tratamiento en medio alcalino de la bauxita en el proceso

Bayer. Es un residuo sólido difícil de eliminar que inutiliza la superficie ocupada, haciéndola no apta para su uso agrario. Es por ello que su eliminación del medio ambiente es esencial para evitar la destrucción del suelo.

En la presente memoria se mostrarán los resultados obtenidos en el estudio de adsorción de un colorante, el azul ácido 25 (AB-25), por lodo rojo. Se hará una introducción de los aspectos más importantes que se van a tratar y se mostrarán los resultados obtenidos en los estudios tanto termodinámicos como cinéticos realizados.

1. Resumo

Os colorantes sintéticos poden existir nos efluentes das augas residuais das distintas industrias, por exemplo, téxtiles, do papel, coiro, plásticos, etc. A descarga das augas residuais das industrias que usan colorantes nas correntes naturais e ríos supón severos problemas ambientais. Mesmo pequenas cantidades de colorante poden dar cor a unha gran masa de auga, o cal non só afecta aos aspectos estéticos se non que tamén reduce a penetración de luz e a fotosíntese das plantas acuáticas. Adicionalmente, a maior parte dos colorantes tamén son tóxicos ou mutaxénicos e canceríxenos. Por estes motivos, a eliminación dos colorantes dos efluentes residuais é unha cuestión importante dende o punto de vista ambiental.

As plantas de tratamentos de residuos convencionais non son adecuadas para a eliminación dos colorantes debido ás súas características non biodegradables. É por iso que se desenvolveron métodos alternativos para a eliminación dos colorantes das augas residuais. Entre estes métodos cabe citar: a coagulación e a floculación, separación utilizando membranas, oxidación, electrocoagulación, e adsorción.

Destes métodos, a adsorción parece presentar o mellor potencial de todos os tratamentos xa que resulta moi eficaz a concentracións baixas de contaminante. Aínda que o carbón activo é o adsorbente máis extensamente usado para o tratamento de augas residuais, é moi caro e ten altos custos de operación debido ao alto prezo do carbón activo e á alta velocidade de fluxo da auga que implica. Estes custos poden ser incrementados en gran xeito cando non hai unidades de rexeneración do carbón activo na zona. Polo tanto, en anos recentes, a atención centrouse no estudo de materiais de baixo custo para eliminar os contaminantes da fase acuosa. Para eliminar os colorantes das augas residuais certos traballos de investigación ⁽¹⁾ centráronse no estudo da utilización de perlita, biomateriais, lama de aluminio reciclado, ceolitas, arxila, bagazos, cinzas voantes, cascace de cacahuete, etc.

A lama vermella (desfeito da bauxita na produción de aluminio) xorde como un subproduto non desexado durante o tratamento no medio alcalino da bauxita no proceso Bayer. É un residuo solido difícil de eliminar que inutiliza a superficie ocupada, facéndoa non apta para o seu uso agrario. É por iso que a súa eliminación do medio é esencial para evitar a destrución do chan.

Na presente memoria mostrarase os resultados obtidos no estudo de adsorción dun colorante, o azul ácido 25 (AB-25), por lama vermella. Farase unha introdución dos aspectos máis importantes que se van tratar e mostraranse os resultados obtidos nos estudos tanto termodinámicos coma cinéticos realizados.

1. Summary

Synthetic dyestuffs can be exist in the effluents of wastewater from different industries, i.e. textiles, paper, leather, plastics, etc. Discharge of wastewater into natural streams and rivers from industries using dyes poses severe environmental problems. Even small quantities of dyes can color large water bodies, which not only affects aesthetic merit but also reduces light penetration and photosynthesis. In addition, most of dyes are either toxic or mutagenic and carcinogenic. For these reasons, the removal of dyes from process or waste effluents becomes environmentally important.

Conventional wastewater treatment plants are not suited to remove the dyes due to their non-biodegradable features. Therefore, alternative methods have been developed to remove the dyes from wastewater, namely, coagulation, flocculation, membrane separation, oxidation, electro-coagulation, and adsorption.

Among these methods, adsorption currently appears to offer the best potential of overall treatment. Although activated carbon is the most widely used adsorbent for wastewater treatment, it is very expensive and has high operating costs due to the high price of the activated carbon and to the high water flow rate always involved, and these costs can be greatly increased when there are no carbon regeneration units locally. Therefore, in recent years, considerable attention has been devoted to the study of different types of low-cost materials in order to remove the pollutants from aqueous phase. Many workers ⁽¹⁾ have employed the perlite, biomaterial, zeolites, clay, bagasse, recycled alum sludge, fly ash, peanut hull, etc., for removing the dye from wastewater.

Red mud (bauxite wastes of alumina manufacture) emerges as unwanted byproducts during alkaline-leaching of bauxite in Bayer process, which is used for the production of alumina from bauxite. It is a solid waste that is difficult to remove that knocked out the footprint, making it not suitable for agricultural use. Therefore, their elimination from the environment is essential to prevent the destruction of the soil.

This report will show the results obtained in the study of adsorption of a dye, acid blue 25 (AB-25), by red mud. It comprises an introduction for the most important aspects that are going to be treated and the results obtained in both thermodynamic and kinetic studies.

2. Introducción

2. Introducción

2.1. Adsorción

La adsorción es la adhesión de partículas a una superficie. La sustancia que se fija por adsorción es el adsorbato y el material subyacente es el adsorbente⁽²⁾.

Las moléculas y los átomos se pueden fijar a las superficies de dos maneras. En la fisisorción (abreviatura de “adsorción física”) hay una interacción de tipo van der Waals entre el adsorbato y el adsorbente.

En la quimisorción (abreviatura de “adsorción química”), las moléculas (o los átomos) se adhieren a la superficie formando un enlace químico (generalmente covalente), y prefieren sitios que maximicen su número de coordinación con el sustrato.

El mecanismo que tiene lugar no es sencillo, ya que los grupos implicados suelen ser de tipos diferentes no muy bien definidos, o incluso un mismo grupo puede participar con diferentes tipos de interacción.

El principal atractivo del uso de la adsorción es que se trata de un proceso barato y que, siendo comparable su eficacia con resinas de intercambio iónico, da frecuentemente buenos resultados.

Diferentes materiales han mostrado su efectividad en la adsorción del AB-25 y a continuación se detallan algunos ejemplos^(1,3,4).

Biomasa	q_{\max} (mmol/g)
Mazorca de maíz	2,546
Carbón activo	1,886
Bagazo	1,619
Médula de caña	1,618
Algodón tratado	1,415
Piel de plátano modificada	0,215
Bagazo de médula vegetal	0,042
Bagazo de médula vegetal	0,035
Serrín	0,014

2.2. Lodo rojo

El lodo rojo es un material complejo obtenido del proceso Bayer cuya composición química y mineralógica varía ampliamente dependiendo de la fuente de bauxita y de los parámetros tecnológicos del proceso. Contiene seis compuestos mayoritarios⁽⁵⁾, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Na_2O y CaO y pequeñas cantidades de diversos elementos minoritarios/traza (como óxidos) tales como V, Ga, Cr, P, Mn, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Mg, Zr, Hf, Nb, U, Th, K, Ba, Sr, tierras raras, etc. Su color de ladrillo rojo es debido a los óxidos de hierro.

2.2.1. Proceso Bayer

En la mayoría de las refinerías, la bauxita se tritura y luego se lava con una solución caliente de hidróxido de sodio y se mantiene aproximadamente a 100 °C por un determinado número de horas (pre-desilicación). El lodo es luego digerido, normalmente entre 150 y 250 °C, para disolver las especies de aluminio solubles⁽⁶⁾ (gibbsita y/o boehmita). La disolución de aluminato sódico resultante se separa de las impurezas sólidas y de la gibbsita precipitada tras enfriarla.

Los sólidos no disueltos se separan con un decantador seguido de unos filtros para eliminar los últimos restos. Los sólidos recogidos en el decantador, llamados lodo rojo, se tratan para recuperar la sosa que no ha reaccionado, que se recicla al proceso.

2.3. Colorantes

Un extenso grupo de contaminantes orgánicos lo constituyen los colorantes, provenientes principalmente de la industria textil, del papel, de fabricación de plásticos y de tintes.

Es fácil detectarlos ya que incluso a concentraciones muy bajas (menos de 1 ppm en alguno de los casos) siguen conservando el color y por ello, los hace peligrosos para el medio ambiente pues impiden la penetración de la luz en el agua, disminuyendo la eficacia de la fotosíntesis en las plantas acuáticas. Por otra parte, muchos de estos colorantes son también tóxicos e incluso algunos son cancerígenos para los organismos acuáticos.

El azul ácido 25 tiene como estructura básica la antraquinona, compuesto orgánico aromático derivado del antraceno⁽⁷⁾. La antraquinona es insoluble en agua pero el azul ácido 25 presenta en su estructura grupos amino y sulfónicos que lo hacen soluble en disolución acuosa.

Los colorantes antraquinónicos representan el segundo grupo más importante de colorantes industriales, después de los azocompuestos, utilizados fundamentalmente para teñir lana, poliamida y cuero⁽⁸⁾.

En la Figura 1 se muestra la estructura del colorante azul ácido 25 cuya fórmula molecular es $C_{20}H_{13}N_2NaO_5S$:

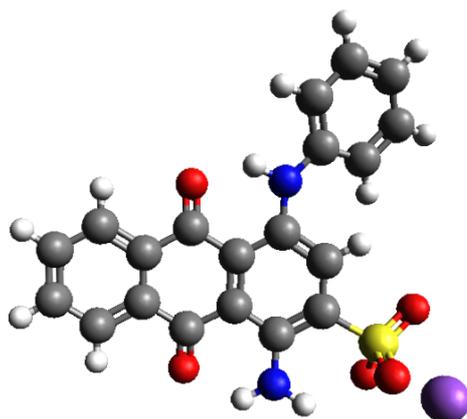


Figura 1. Estructura química del azul ácido 25

2.4. Modelos de equilibrio en los procesos de adsorción

Los modelos más utilizados para describir estos sistemas de equilibrio son las ecuaciones de Langmuir y Freundlich. El modelo de Langmuir es válido para una adsorción en monocapa en una superficie con sitios activos homogéneos. El modelo de Freundlich puede ser aplicado a sistemas de adsorción no ideales con superficies heterogéneas y adsorción en multicapas.

La isoterma de Langmuir conlleva varias suposiciones:

- La superficie contiene sitios de adsorción.
- Todas las moléculas adsorbidas interactúan con un único sitio y no con el resto.
- La adsorción está limitada a una sola capa.
- La energía de todos los sitios es idéntica e independiente de la presencia de especies adsorbidas en sitios vecinos.

A continuación se muestra la ecuación de la isoterma de Langmuir:

$$q_{eq} = \frac{Q_{max} b C_{eq}}{1 + b C_{eq}}$$

Donde q_{eq} corresponde a la cantidad de adsorbente adsorbido en el equilibrio, C_{eq} es la concentración en la solución del colorante en el equilibrio, Q_{max} es la capacidad máxima de adsorción que corresponde a la saturación de la monocapa y b es una constante relacionada con la energía de adsorción.

El modelo de Freundlich se presenta a continuación en la ecuación:

$$q_{eq} = K_F C_{eq}^{1/n}$$

Donde K_F y n son constantes empíricas relacionadas con la capacidad del sólido para absorber el soluto y con la afinidad del adsorbato por la superficie del adsorbente respectivamente.

El modelo de adsorción de Freundlich no llega a hacerse lineal a bajas concentraciones y permanece cóncavo al eje de abscisas correspondiente a concentración del adsorbato, no pudiendo observarse un valor límite o de saturación.

2.4.1. Linealización de las isothermas

Las isothermas de Langmuir y Freundlich pueden ser linealizadas, lo que permite estimar sus dos parámetros ajustables por regresión lineal.

La linealización de Langmuir se puede realizar de varias formas (Tabla 1) que darán resultados distintos para cada caso. Esto es debido a que las distintas ecuaciones linealizadas modifican la distribución de los errores asociados a los distintos puntos.

Tabla 1 Transformaciones lineales de la isoterma de Langmuir y Freundlich

Linealización	Transformación
Doble recíproca (Lineweaver-Burk)	$1/q = 1/q_{\max} + (1/q_{\max} \cdot b)(1/C)$
Recíproca (Langmuir)	$C/q = 1/bq_{\max} + (1/q_{\max}) \cdot C$
Eadie-Hofstee	$q = q_{\max} - (1/b)(q/C)$
Coficiente de distribución (Scatchard)	$q/C = (q_{\max} \cdot b) - (b \cdot q)$

La linealización de la ecuación de Freundlich se realiza simplemente tomando logaritmos.

3. Parte Experimental

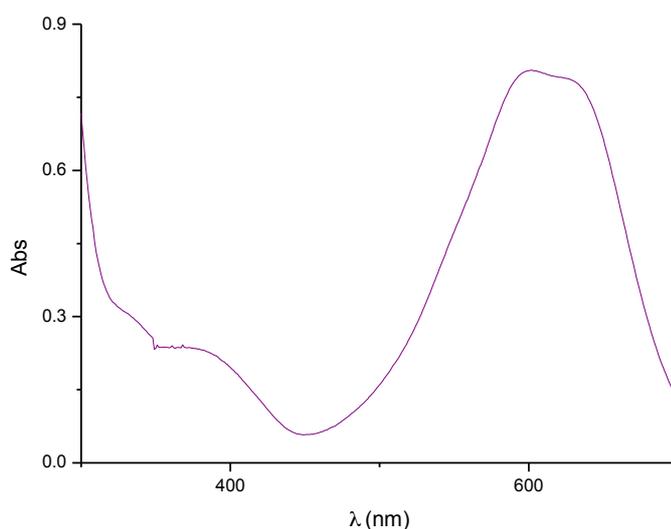
3. Parte Experimental

3.1. Adsorbato

Se ha utilizado azul ácido 25 marca Sigma-Aldrich, con una pureza del 45%. Su peso molecular es $416,39 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ y presenta un máximo de absorción a una longitud de onda de 602 nm.

Se prepararon varias disoluciones acuosas del colorante por pesada del AB-25 y empleando agua Milli-Q y de concentraciones en el intervalo entre 0,1 y 12 mM.

La concentración de estas disoluciones se determina por medidas espectrofotométricas usando un espectrofotómetro UV-Vis, modelo CARY 100 Bio y se calcula con el coeficiente de extinción molar igual a $12400 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$ ⁽⁹⁾



Espectro de absorción del azul ácido 25 0,1 mM.

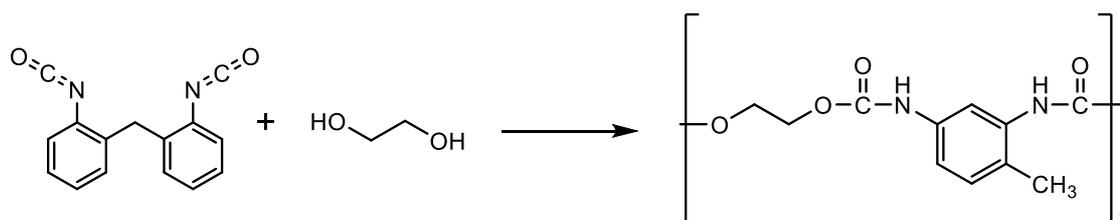
3.2. Adsorbente

Como ya se ha comentado previamente, el lodo rojo es un residuo de la producción de la alúmina a partir de bauxita que se genera en el proceso Bayer. Éste somete a secado y se obtiene un polvo fino, que se pesará en balanza analítica para los procesos de adsorción.

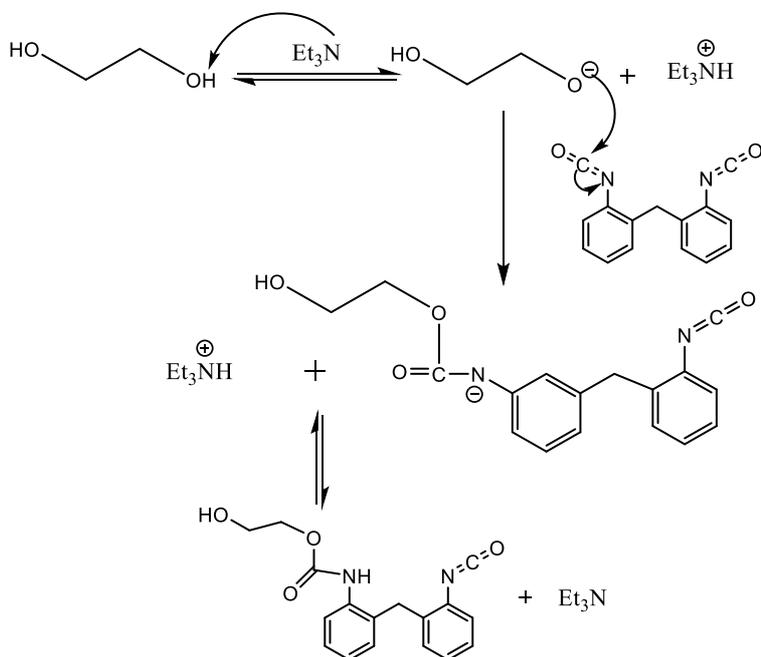
3.3. Adsorbente inmovilizado

Se inmoviliza el adsorbente con espuma de poliuretano. Ésta se prepara a partir de un diisocianato (diisocianato de difenilmetano (MDI)), un polioliol y el propio lodo rojo en la cantidad deseada. Simplemente se mezclan 10 g de lodo rojo con 7 ml del diisocianato y a continuación se le añadirá 10 ml del polioliol, dejando que se forme la espuma.

La reacción que tiene lugar es una reacción de polimerización por condensación-adición (10).



Que transcurre mediante este mecanismo en el cual la amina actúa como catalizador:



La amina seguirá reaccionando con el alcohol y éste con el diisocianato para formar el polímero.

3.4. Procedimiento experimental

En todos los estudios se pesa cierta cantidad de lodo rojo y se le añade AB-25 de concentración determinada, se mantiene en agitación a 175 rpm en un agitador orbital de la marca Edmund Bühler durante 24 h para posteriormente tomar una alícuota y centrifugarla en una centrifuga de la marca Nahita Centrifuge Model 2716 durante 3 min a 10000 r/min. Mediante medidas espectrofotométricas de la disolución sobrenadante, se calcula la concentración de la misma.

La adsorción del compuesto (q) se calcula de acuerdo a la ecuación

$$q = \frac{V \cdot (C_i - C_e)}{m}$$

Donde V es el volumen de la disolución del metal (L), C_i es la concentración inicial del adsorbato en disolución, C_e la concentración en el equilibrio y m es la masa del adsorbente expresada en gramos.

3.4.1. Influencia del pH en la adsorción del azul ácido 25

Se realizó un estudio de la influencia del pH en la adsorción del azul ácido 25 usando disoluciones de concentración inicial 0,2 mM de colorante y 0,1 g de lodo rojo. El pH de las distintas disoluciones empleadas se encuentra en el intervalo entre 2 y 10. Para mantener el pH en un valor determinado, se añadió HNO₃ 3,4 M. Las disoluciones se mantuvieron en agitación 24 h a temperatura ambiente.

3.4.2. Influencia de la cantidad de lodo rojo en la adsorción del ácido azul 25

Se realizó un estudio para optimizar la cantidad de lodo rojo a emplear en experiencias posteriores de adsorción usando una concentración de 0,1 mM de AB25, pH= 3 y una cantidad de lodo rojo en un rango de entre 0,05 y 0,5 g. Las disoluciones se mantuvieron en agitación 24 h a temperatura ambiente.

3.4.3. Isotherma de adsorción

Los experimentos se realizaron en matraces Erlenmeyer de 100 ml con 40 ml de disolución del colorante y 0,1 g de lodo rojo. Las disoluciones se dejaron agitando 24 h a temperatura ambiente. Se ajustó el pH en torno a 3 mediante la adición de HNO₃ 3,4 M previamente preparado.

3.4.4. Estudio de la adsorción del lodo inmovilizado

Con el fin de averiguar si el lodo rojo funcionaba como buen adsorbente del azul ácido 25 inmovilizado en espuma de poliuretano, se procedió a inmovilizarlo. Se observó que el colorante era adsorbido poniendo en contacto AB-25 0,2 mM con lodo rojo inmovilizado en una espuma de poliuretano a la que se le añadieron 10 g de lodo. Además se realizó un blanco con la espuma sin lodo rojo.

Ambas fueron trituradas y tamizadas con calibre menor a 0,2 mm. Se pesaron 0,1 g de ambas espumas y se le añadieron a cada una 40 ml de colorante y se ajustaron a pH= 3. Las disoluciones se mantuvieron en agitación 24 h a temperatura ambiente.

3.5. Estudios cinéticos

Se realizaron estudios cinéticos del proceso añadiendo 0,125 g de lodo rojo a 50 ml de disolución de azul ácido 25 a cuatro concentraciones diferentes 0,1, 2,92, 4,6 y 9 mM y a pH= 3. Se tomaron alícuotas para hacer las medidas cada cierto tiempo hasta que se alcanzó el equilibrio.

Resultados y discusión

4. Resultados y discusión

4.1. Estudios de equilibrio

4.1.1. Influencia del pH en la adsorción del azul ácido 25

Se realizó un estudio de la influencia del pH sobre el proceso de adsorción para determinar cuáles eran las condiciones más adecuadas de trabajo.

En la Figura 1 se muestra cómo varía la capacidad de adsorción del colorante, q , con una concentración inicial de 0,2 mM por el lodo rojo (0,1 g) frente al pH.

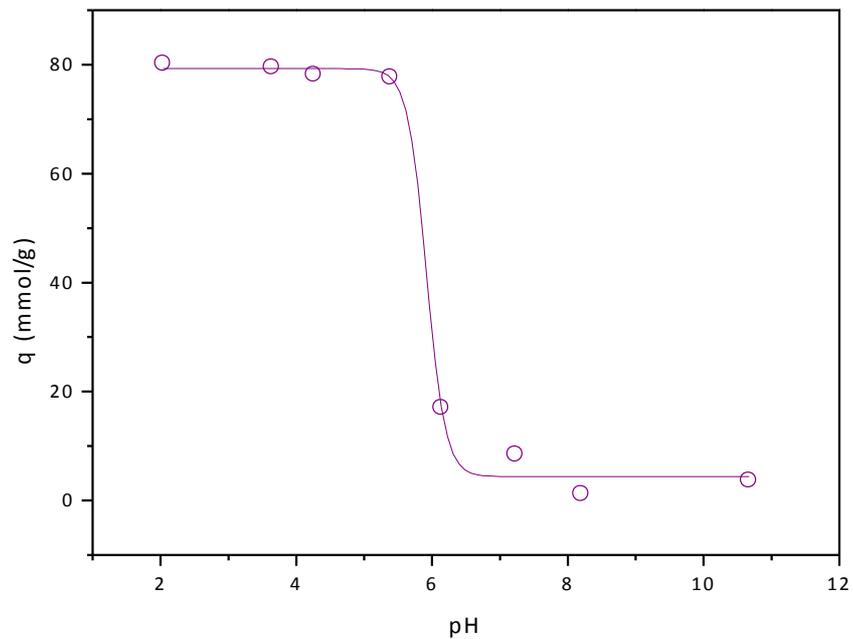


Figura 1. Variación de q vs. pH para la adsorción de AB-25 0,2 mM por lodo rojo

La gráfica se ajusta muy bien a una curva sigmoide y puede observarse que la adsorción es más efectiva a pH ácido pues la cantidad adsorbida es mayor en el intervalo de pH de 2 a 5. A la vista de este comportamiento, se utilizó como pH de trabajo un pH=3

4.1.2. Influencia de la cantidad de lodo rojo en la adsorción del ácido azul 25

Para optimizar la cantidad de lodo rojo a utilizar en los estudios de adsorción se realizaron una serie de experiencias variando la cantidad de lodo rojo y manteniendo constante la concentración de AB-25.

En la Figura 2 se muestra la representación de la capacidad de adsorción del colorante con una concentración de 0,2 mM por el lodo rojo, frente a la masa de lodo rojo añadido con un pH igual a 3.

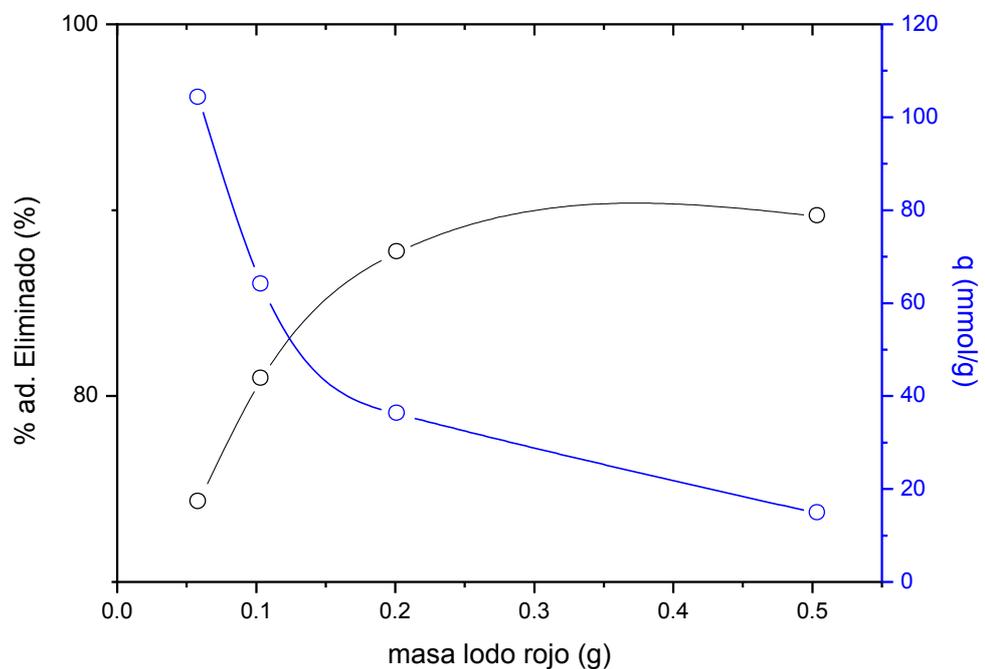


Figura 2. Variación de q y % de adsorbente eliminado vs. masa lodo rojo

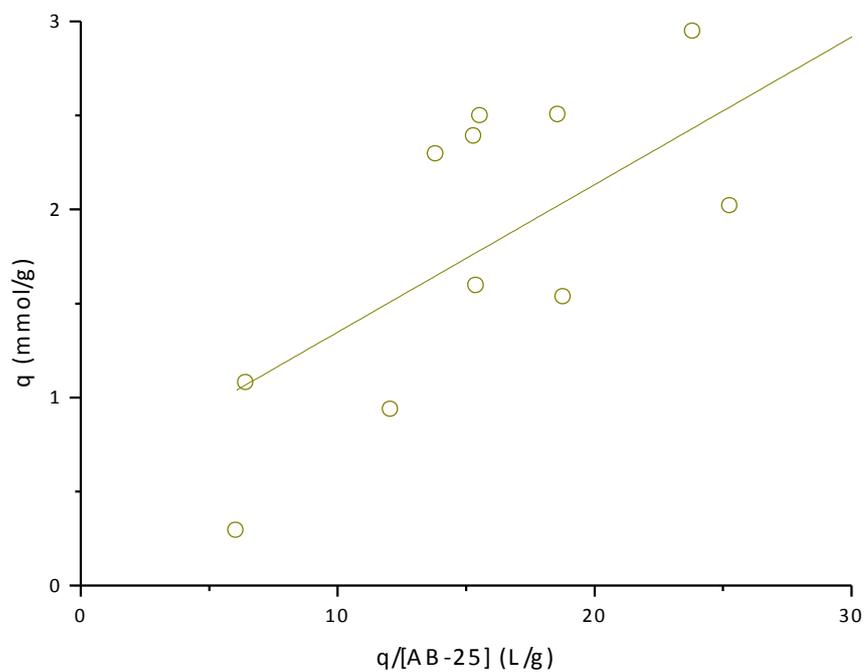
Como se puede observar en la figura, el porcentaje de AB-25 adsorbido aumenta con la cantidad de lodo rojo pero la q disminuye, por lo que la masa de lodo óptima es 0,1 g y por ello se utilizó en los experimentos posteriores.

4.1.3. Isotermas de adsorción

La mejor manera de evaluar un adsorbente es cuantificar su capacidad de adsorción. Para ello es necesaria la caracterización del equilibrio después de que adsorbente esté en contacto con la disolución del contaminante. Se produce una situación de equilibrio a una temperatura dada, entre el adsorbato disuelto en disolución y el adsorbido en el adsorbente.

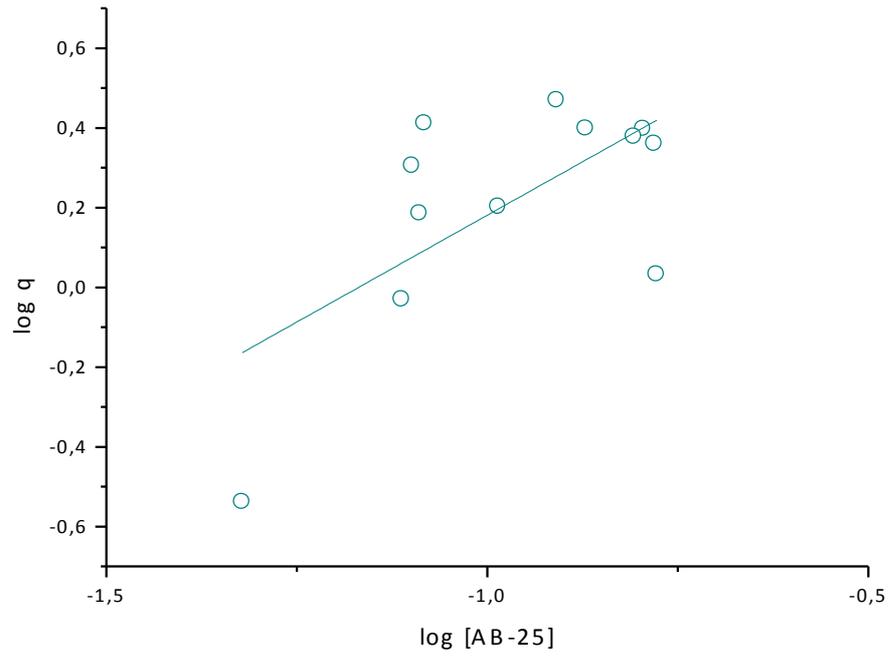
Así, la relación existente entre la cantidad de soluto adsorbido por unidad de adsorbente, q , (en unidades de masa del soluto por masa de adsorbente) y la concentración de dicho contaminante en la fase líquida, C_e , a una temperatura determinada, constituye lo que se denomina una isoterma de adsorción ⁽¹¹⁾.

Para obtener un valor aproximado de q_{\max} y b se hace la linealización Eadie-Hofstee de la ecuación de Langmuir:



A partir de la linealización se obtienen unos valores de $q_{\max}=0,68$ mmol/g y $b=6,56$ L/mmol.

Se repite el mismo procedimiento con la linealización de la ecuación de Freundlich, obteniendo como resultados $K_F = 17,9 \text{ L/g}$ y $n = 0,93$ obtenidos de la siguiente gráfica:



En la Figura 3 se muestra la isoterma de adsorción del AB-25 por lodo rojo, a temperatura ambiente. En dicha figura, se presentan los puntos experimentales y las curvas correspondientes a los modelos de Langmuir y Freundlich, calculadas mediante un método de optimización no lineal. En la aplicación de dicho método se ha hecho uso de los parámetros obtenidos previamente en los correspondientes ajustes lineales.

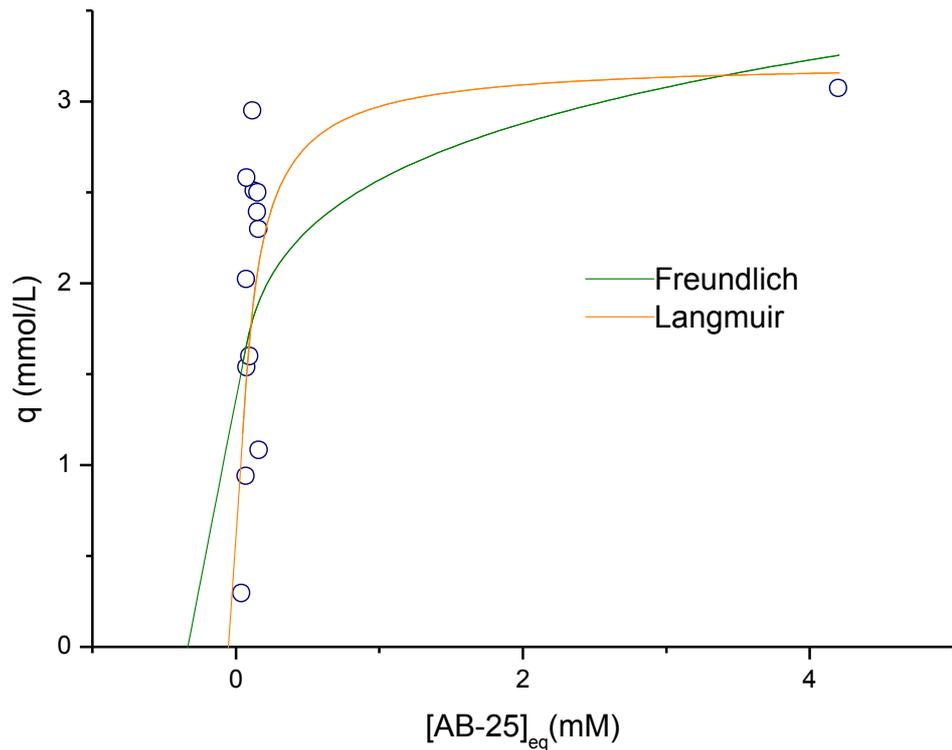


Figura 3. Isotherma de adsorción del AB-25 a pH 3 con ajuste a los modelos de Langmuir y Freundlich.

En la Tabla 1 se muestran los parámetros obtenidos para los modelos de Langmuir y Freundlich. A la vista de la gráfica que se presenta en la figura 3 puede concluirse que el modelo que mejor representa los datos experimentales es el modelo de Langmuir y por tanto, este es el modelo más idóneo para determinar la capacidad de adsorción del AB-25 por lodo rojo.

Modelo	q máx. ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$) ¹⁾	b ($\text{mmol}^{-1} \cdot \text{L}$) ¹⁾	K_F ($\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	n ($\text{mmol}^{-1} \cdot \text{L}$)
Langmuir	$3,2 \pm 0,6$	12 ± 6		
Freundlich			$2,89 \pm 0,02$	$10,1 \pm 0,6$

Tabla 1 Parámetros de adsorción para las isotermas de Langmuir y Freundlich

4.1.4. Estudio de la adsorción del lodo inmovilizado

Tras poner en contacto las espumas con la disolución y dejar transcurridas 24 horas, se observó que en ambos casos el AB-25 fue completamente adsorbido ya que las disoluciones se volvieron incoloras lo que significa que todo el AB-25 ha sido adsorbido. Hará falta realizar estudios adicionales para determinar en qué grado afecta a la adsorción la presencia del lodo en la espuma (en caso de que la adsorción no se deba únicamente a la espuma). En todo caso se trata de un proceso de adsorción más lento que el de lodo sin inmovilizar.

4.2. Estudio cinético

4.2.1. Cinéticas de adsorción

El objetivo del estudio cinético es determinar el tiempo mínimo necesario para que se alcance el equilibrio de adsorción. En la figura 4 se puede ver es equilibrio a diferentes concentraciones.

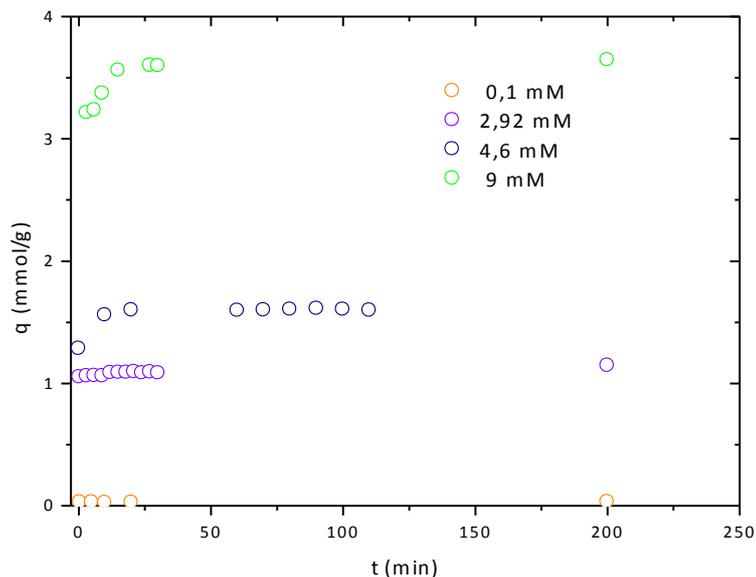


Figura 4. Representación del equilibrio de adsorción del AB-25 por lodo rojo frente al tiempo a diferentes concentraciones.

Se alcanzó el equilibrio en media hora, lo que nos indica que es un proceso muy rápido. De hecho, es un tiempo más corto que el habitualmente empleado en la adsorción del AB-25 con otros materiales adsorbentes.

4. Conclusiones

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el estudio realizado permiten llegar a las siguientes conclusiones:

1. La isoterma de adsorción muestra que el lodo rojo es un material adsorbente para el azul ácido 25 y además la capacidad de adsorción del lodo rojo comparada con otros materiales es superior.
2. La adsorción del AB-25 depende del pH. Es más efectiva a pH ácido y prácticamente nula a partir de pH 7.
3. El estudio cinético nos indica que es un proceso rápido pues transcurrida media hora se alcanza el equilibrio en el sistema.
4. El lodo inmovilizado en espuma de poliuretano adsorbe de forma muy pero de forma más lenta que el lodo sin inmovilizar el azul ácido 25.

5. Conclusións

Os resultados obtidos no estudo realizado permiten chegar ás seguintes conclusións:

1. A isoterma de adsorción mostra que a lama vermella é un material absorbente para o azul ácido 25 e ademais a capacidade de adsorción da lama vermella comparada con outros materiais é superior.
2. A adsorción do AB-25 depende do pH. É máis efectiva a pH ácido e practicamente nula a partir de pH 7.
3. O estudo cinético indícanos que é un proceso rápido pois transcorrida media hora se alcanza o equilibrio no sistema.
4. A lama inmobilizada en espuma de poliuretano absorbe de forma moi eficaz pero de forma máis lenta que a lama sen inmobilizar o azul ácido 25.

5. Conclusions

The results of the study allow reaching the following conclusions:

1. The adsorption isotherm shows that the red mud is an adsorbent material for acid blue 25 and in addition the adsorption capacity of the red mud compared with other materials is superior.
2. The adsorption of the AB-25 depends on pH. It is most effective at acid pH and virtually zero from pH 7.
3. Kinetic study indicates that process is a quick for half an hour after equilibrium is reached in the system.
4. Immobilized red mud on polyurethane foam adsorbs very effectively but more slowly than the mud without freeze the acid blue 25.

5. Bibliografia

6. Bibliografía

1. Crini, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology* 2006, **97**, 1061-1085.
2. De Paula, A.; De Paula, J. *Química Física*, 8th ed.; Médica Panamericana, 2008.
3. Guiso, M. G.; Biesuz, R.; Vilariño, T.; López-García, M.; Rodríguez Barro, P.; Sastre Vicente, M. E. Adsorption of the Prototype Anionic Anthraquinone, Acid Blue 25, on a Modified Banana Peel: Comparison with Equilibrium and Kinetic Ligand-Receptor Biochemical Data. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2014, **53**, 2251-2260.
4. Chan, L. S.; Cheung, W. H.; Allen, S. J.; McKay, G. Separation of acid-dyes mixture by bamboo derived active carbon. *Separation and Purification Technology* 2009, **67** (166).
5. Agatzini-Leonardou, S.; Oustadakis, P.; Tsakiridis, P. E.; Markopoulos, C. Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure. *Journal of Hazardous Materials* 2008, **157** (2-3), 579-586.
6. Tor, A.; Cengeloglu, Y. Removal of congo red from aqueous solution by adsorption onto acid activated red mud. *Journal of Hazardous Materials* 2006, **138** (2), 409-415.
7. Zollinger, H. *Color chemistry synthesis, properties, and applications of organic dyes and pigments*; WILEY-VHCA, 2003.
8. Hunger, K. *Industrial dyes: chemistry, properties, applications*; Weinheim, Wiley-VCH, 2003.
9. Prestera, T.; Prochaska, H. J.; Talalay, P. Inhibition of NAD(P)H:(Quinone-Acceptor) Oxidoreductase by Cibacron Blue and Related Anthraquinone Dyes: A Structure-Activity Study. *Biochemistry* 1992, **31** (3), 824-833.
10. L. G. Wade, J. *Química Organica*, 5th ed.; Pearson Educación: Madrid, 2004.
11. Kinniburgh, D. General purpose adsorption isotherms. 1986, **20** (9).