



# Diseño estadístico para la remoción eficiente del colorante rojo 40 sobre tusa de maíz\*

Anderson Moreno\*\* / Danilo Figueroa\*\*\* / Angelina Hormaza\*\*\*\*

*Statistical design to efficiently remove red 40 dye on corn cobs*

*Desenho estatístico para a remoção eficiente do corante vermelho 40 sobre espiga de milho*

## RESUMEN

**Introducción.** Los efluentes industriales coloreados son un indicador evidente de la contaminación de los cuerpos de agua; la presencia de cantidades mínimas de colorante impacta negativamente la estética del medio y repercute drásticamente en los procesos de autorregeneración del recurso hídrico, afectando gravemente la vida acuática. Diversos métodos fisicoquímicos y biológicos han sido utilizados para el tratamiento de efluentes coloreados y se han obtenido eficiencias considerables; no obstante, sus costos elevados y la generación de subproductos más tóxicos limitan su implementación. La adsorción con adsorbentes alternativos ha mostrado ser una opción eficiente para la eliminación de colorantes en solución. **Objetivo.** Alcanzar la máxima remoción del colorante Rojo 40 sobre tusa de maíz mediante un diseño estadístico de experimentos (DEE) y caracterizar el material adsorbente. **Materiales y métodos.** Las principales variables del proceso de adsorción fueron evaluadas bajo sistema discontinuo a través de un diseño factorial, cuya realización y análisis se apoyó en el software Statgraphics. La concentración residual de colorante fue determinada mediante absorbancia,

---

\*Artículo derivado de la investigación "Utilización de residuos agroindustriales para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes". Financiado por COLCIENCIAS a través del Proyecto 1118-489-25228. Vigencia: Enero de 2010 - Enero de 2012. \*\* Estudiante Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Investigador, Grupo de Investigación SIRYTCOR. \*\*\*Ingeniero Químico, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Investigador, Grupo de Investigación SIRYTCOR. \*\*\*\*Magíster en Química, Ph.D, Profesor Asociado Escuela de Química – Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Director Grupo de Investigación SIRYTCOR.

Correspondencia: Angelina Hormaza, e-mail: ahormaza@unal.edu.co

Artículo recibido: 14/04/2012; Artículo aprobado: 21/11/2012

utilizando un espectrofotómetro UV-Vis Perkin Elmer Lambda 35. **Resultados.** Una remoción máxima del 99% fue alcanzada con el modelo estadístico obtenido y un buen ajuste ( $R^2 = 98.97\%$ ). El pH fue la variable más significativa en la adsorción del Rojo 40. **Conclusiones.** Se confirmó que la tusa de maíz es un excelente material adsorbente y que la alta remoción alcanzada del colorante fue posible gracias al DEE que, además de reducir costos, posibilita un análisis de las variables más influyentes en el proceso.

**Palabras clave:** remoción de colorantes, Rojo 40, adsorbentes alternativos, tusa de maíz, diseño factorial, diseño de superficie central compuesto.

## ABSTRACT

**Introduction.** Industrial colored effluents are an evident indicator of water pollution. Small quantities of dye affect, negatively, the appearance of water bodies and dramatically affect water regeneration, affecting the aquatic life. Several physical-chemical and biological methods have been used to treat colored effluents, with considerable efficiency degrees, but they are expensive and produce more toxic by-products, so there are problems for their use. Adsorption with alternative adsorbents has proved its efficiency to eliminate colorants in solutions. **Objective.** Achieving the maximum removal of the red 40 dye on corn cob by the use of a statistical experimental design and characterize the adsorbent material. **Materials and methods.** The most important variables of the adsorption process were evaluated under a discontinuous system through a factorial design, with the support of the Statgraphics software for its execution and analysis. The remaining concentration of the colorant was determined with the absorbance, by the use of an UV-vis Perkin Elmer Lambda spectrophotometer. **Results.** A maximum removal of 99% was achieved with the statistical model used, and a good adjustment ( $R^2$  equals 98.97%). The pH was the most significant variable in the adsorption of the red 40 dye. **Conclusions.** Corn cob proved to be an excellent adsorption material and the high removal degree achieved was due to the statistical experimental design, which is more economic and facilitates the analysis of the most important variables involved in the process.

Key words: Dye removal, Red 40, Alternative adsorbents, corn COB, Factorial design, Central surface composite design.

## RESUMO

**Introdução.** Os efluentes industriais coloridos são um indicador evidente da contaminação dos corpos de água; a presença de quantidades mínimas de corante impacta negativamente a estética do meio e repercute drasticamente nos processos de auto-regeneração do recurso hídrico, afetando gravemente a vida aquática. Diversos métodos físico-químicos e biológicos foram utilizados para o tratamento de efluentes coloridos e se obtiveram eficiências consideráveis; não obstante, seus custos elevados e a geração de subprodutos mais tóxicos limitam sua implementação. A adsorção com adsorventes alternativos mostrou ser uma opção eficiente para a eliminação de corantes em solução. **Objetivo.** Atingir a máxima remoção do corante Vermelho 40 sobre espiga de milho mediante um desenho estatístico de experimentos (DEE) e caracterizar o material adsorbente. **Materiais e métodos.** As principais variáveis do processo de adsorção foram avaliadas sob sistema descontínuo através de um desenho fatorial, cuja realização e análise se apoiou no software Statgraphics. A concentração residual de corante foi determinada mediante absorbância, utilizando um espectrofotómetro UV-Vis Perkin Elmer Lambda 35. **Resultados.** Uma remoção máxima do 99% foi atingida com o modelo estatístico obtido e um bom ajuste ( $R^2 = 98.97\%$ ). O PH foi a variável mais significativa na adsorção do Vermelho 40. **Conclusões.** Confirmou-se que a espiga de milho é um excelente material adsorbente e que a alta remoção atingida do corante foi possível graças ao DEE que, além de reduzir custos, possibilita uma análise das variáveis mais influyentes no processo.

**Palavras importantes:** remoção de corantes, Vermelho 40, adsorventes alternativos, espiga de milho, desenho fatorial, desenho de superfície central composto.

## INTRODUCCIÓN

La industria textil, la alimenticia y la farmacéutica representan, sin duda, importantes renglones para la consolidación de la economía de las ciudades y regiones donde se ejerce su actividad; su aporte se refleja tanto en las divisas generadas, como en el cubrimiento de un amplio sector laboral. No obstante este cúmulo de beneficios, el vertimiento de sus efluentes con un mínimo o nulo tratamiento genera graves perturbaciones al ecosistema circundante. Se estima que los efluentes de las industrias textiles contienen, aproximadamente, el 8-20% de los colorantes usados para el proceso de tinción, como resultado de su consumo incompleto, a lo cual se suman cantidades remanentes de los productos químicos auxiliares<sup>1</sup>. La presencia de colorantes en los cuerpos de agua es estéticamente indeseable y reduce la penetración de la radiación solar, afectando drásticamente tanto la fotosíntesis como la fotólisis de diferentes contaminantes y, por tanto, la biota acuática<sup>2-7</sup>.

Existen diversos métodos tanto físicos como químicos para el tratamiento de colorantes en solución, entre los que cabe mencionar: floculación, procesos avanzados de oxidación, foto-fenton, fotocatalisis heterogénea, ozonización, filtración, intercambio iónico y adsorción. Se han obtenido con ellos porcentajes de decoloración satisfactorios; sin embargo, la mayoría de estos procesos son costosos e implican una eliminación incompleta del colorante y/o la generación de lodos o especies carcinogénicas y tóxicas<sup>2,5,8-10</sup>. Otra alternativa son los tratamientos biológicos; ellos han mostrado ser eficientes, pero la experimentación con volúmenes considerables es aún no realizable<sup>11,12</sup>.

La adsorción con carbón activado ha sido una de las estrategias más desarrolladas y eficientes, pero su elevado costo restringe su implementación. Este adsorbente es obtenido a partir de materiales que poseen un alto contenido de carbono y se caracteriza por una gran capacidad de adsorción debido a su alta porosidad y gran área superficial específica con alto grado de reactividad; sin embargo, sus propiedades fisicoquímicas son afectadas en medios ácidos, conduciendo a una disminución de su capacidad adsorptiva.<sup>7,10,11</sup> Por ello, la investigación de materiales alternativos, de origen natural con propiedades similares, de fácil adquisición y mínimo valor económico se ha fortalecido enormemente en los últimos años<sup>6-8,12-14</sup>. La adsorción con residuos agroindustriales se ha convertido en un método adecuado para la separación de contaminantes en solución, permitiendo su retención eficiente, así como la posible recuperación y reciclaje de los materiales adsorbentes, que señalan, además, sus bondades ambientales.

El colorante aniónico Rojo 40, (R40), es ampliamente utilizado en la industria textil, alimentaria y de tintas de tatuajes<sup>4,18</sup>. Es un colorante ácido de la clase de los monoazos, también llamado Rojo allura, con fórmula química  $C_{18}H_{14}N_2Na_2O_8S_2$ ; PM 496.42 g mol<sup>-1</sup> y una longitud de onda correspondiente a la máxima absorción,  $\lambda_{\text{máx}}=502$  nm. Además, tiene propiedades ácidas y una estructura aromática constituida por tres anillos bencénicos. Se han establecido para este colorante características de toxicidad y patogenicidad en la mayoría de productos alimenticios en los cuales es adicionado, como bebidas gaseosas, productos lácteos y de repostería, de tal forma que su consumo no es recomendado para la población infantil en algunos países de Europa<sup>16,18</sup>.

Con este preámbulo, el objetivo del presente trabajo se orientó a la optimización de las condiciones del proceso de adsorción del colorante R40 sobre la tusa de maíz. Para tal propósito, se implementó el DEE, donde es necesario conocer qué variables influyen significativamente en el sistema y cómo se correlacionan, se utilizó un diseño factorial y la metodología de superficie respuesta. El DEE permite observar el efecto combinado de todos los factores del proceso en un menor tiempo y reemplaza el método tradicional de variar consecutivamente un factor a la vez, análisis que requiere un gran número de experimentos y demandaría mayores costos para su ejecución<sup>19</sup>. Adicionalmente, se presenta la caracterización bromatológica y morfológica del material adsorbente.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Preparación y caracterización del adsorbente.

La tusa de maíz (TM) fue obtenida de las agroindustrias de la región de Medellín. El pre-tratamiento del subproducto agrícola incluyó un enjuague con agua desionizada obtenida mediante resinas de intercambio iónico Marca E&Q, luego su molienda y tamizado hasta obtener partículas con tamaño inferior de 0.75mm. Posteriormente, se lavó con agua desionizada hasta remover la materia orgánica, y fue secada en un horno de convección forzada marca E&Q, a 80 °C durante 48h.

Con relación a la caracterización, el análisis bromatológico de TM fue hecho en el Laboratorio de Análisis Químico y Bromatológico de la Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín– determinando la evaluación de fibra de detergente ácido (FDA), fibra de detergente neutro (FDN), almidón, cenizas y lignina. La morfología de la superficie fue examinada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en un equipo JEOL JSM 5910 LV en el Laboratorio de Microscopía Avanzada de la Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín–.

### Análisis y preparación del colorante

El R40 fue obtenido de la empresa COLORQUÍMICA S.A. Inicialmente se preparó una solución a una concentración 1000 mg L<sup>-1</sup> con agua desionizada a pH = 2.0, ajustado con alícuotas de 1.0 M de HCl y NaOH, Marca Merck. A partir de la solución estándar se realizaron diferentes disoluciones en las mismas condiciones entre 5.0 y 40 mg L<sup>-1</sup>; para su determinación se construyeron curvas de calibración. El método de cuantificación del colorante fue la espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-Vis) con el espectrofotómetro UV-Vis de doble haz Marca Perkin Elmer Lambda 35.

### Estudio de adsorción

Inicialmente se realizaron ensayos preliminares bajo sistema discontinuo, explorando el pH en un intervalo de 2.0-12; se registraron remociones nulas a partir de valores de pH superiores a 5.0. Los parámetros fijos para este estudio fueron: agitación constante de 125 rpm, mediante un agitador Marca Heidolph, un volumen de 25 mL, temperatura ambiente (25 °C) y tamaño de partícula menor de 0.75 mm. Los parámetros más influyentes en el proceso fueron evaluados mediante diseño factorial, cuya variable de respuesta, porcentaje de remoción del R40, se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Rem} = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

Donde C<sub>o</sub> y C<sub>f</sub> son la concentración inicial y final del colorante, respectivamente.

### Diseño estadístico de experimentos

#### Diseño factorial completo de cribado

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos preliminares y los valores límites, se elaboró un diseño factorial de cribado, con el fin de reducir el número de experimentos necesarios para la optimización del proceso. El diseño factorial se debe cribar en función de su influencia de respuesta considerando su significancia estadística, para revelar los efectos e interacciones de las variables más influyentes en el sistema y la importancia de los factores evaluados en un mismo tiempo.

Las variables estudiadas en el diseño factorial fueron: concentración inicial de colorante (C), dosificación del adsorbente (D), tiempo de contacto (t) y pH. Se hizo un diseño factorial completo 2<sup>4</sup>, con

el fin de determinar los parámetros más influyentes con la variable de respuesta y el porcentaje de remoción (%R), tabla I.

**Tabla I. Detalles de los diseños estadísticos de experimentos con punto central del sistema TM – R40**

Tuza- Rojo 40						
	Diseño factorial 2 <sup>4</sup>			Diseño de superficie		
	Bajo	Central	Alto	Bajo	Central	Alto
pH	2.0	3.0	4.0	-	-	-
t (h)	2	4	6	-	-	-
C (mgL <sup>-1</sup> )	10.0	22.5	35.0	10.0	22.5	35.0
D (g L <sup>-1</sup> )	1.0	2.4	3.8	1.0	4.5	8.0

La elaboración y el análisis de los diseños experimentales fueron realizados con el software Statgraphics Centurion XV.II versión 15.2.06, apoyados en los diagramas de Pareto, diagramas de superficie de respuesta y diagramas de probabilidad normal de residuales.

### **Diseño de superficie de respuesta**

El diseño de superficie de respuesta se llevó a cabo con la información obtenida del primer diseño factorial 2<sup>4</sup>, cuyos detalles se presentan en la tabla I; esta superficie permitió ajustar para todos los factores un segundo orden, expresando una curvatura que posibilitó encontrar las condiciones óptimas de la variable de respuesta<sup>20</sup>.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización del adsorbente**

Los análisis bromatológicos analizados en base seca mostraron una composición química para el residuo agrícola TM de 0.00% almidón, 1.22% cenizas, 56.13% fibra en detergente ácido, 85.34% fibra en detergente neutro y 7.39% lignina, permitiendo calcular los contenidos de celulosa y hemicelulosa, cuyo valor fue de 48.74% y 29.21%, respectivamente, según el método Van Soest<sup>6,21,22</sup>.

En la figura 1a, se observa la micrografía de la tusa del maíz sin el colorante como una superficie en forma tubular y uniforme, con abertura aproximada de 10 micras y ligeramente corrugada. En la figura 1b, se observa la superficie del material después del proceso de adsorción del colorante R40, evidenciando de forma clara el desgaste del adsorbente, una descamación y leve fraccionamiento.

### **Análisis del diseño factorial 2<sup>4</sup> de cribado**

El análisis de varianza del porcentaje de remoción de R40 representado en el diagrama de Pareto es mostrado en la figura 2<sup>a</sup>, y la superficie de respuesta en la figura 2b, cuyo modelo matemático obtenido para este diseño fue:

$$\% \text{ Remoción} = 109,328 - 24,7881 * \text{pH} + 13,2862 * \text{t} - 2,36294 * \text{C} + 28,5255 * \text{D} - 3,85966 * \text{pH} * \text{t} + 0,495089 * \text{pH} * \text{C} - 7,94791 * \text{pH} * \text{D} + 0,136419 * \text{C} * \text{D} + 0,00326565 * \text{pH} * \text{C} * \text{D} \quad (2)$$

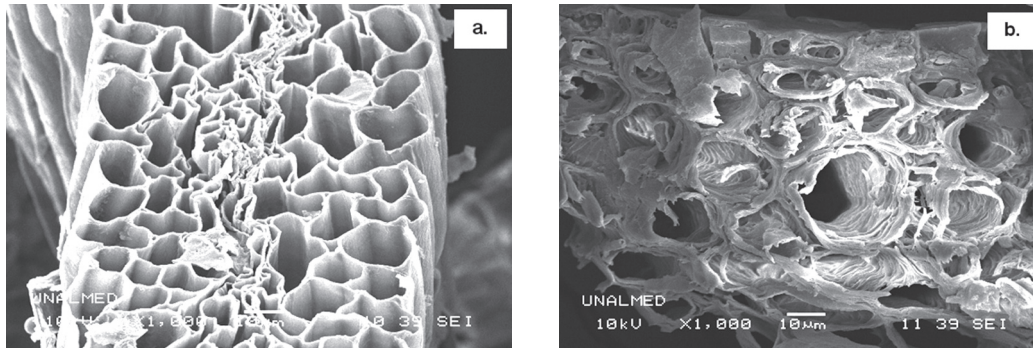


Figura 1. Imágenes en SEM de TM, aumento x1000 y escala 10 µm. a) Material TM. b) Material TM con R40

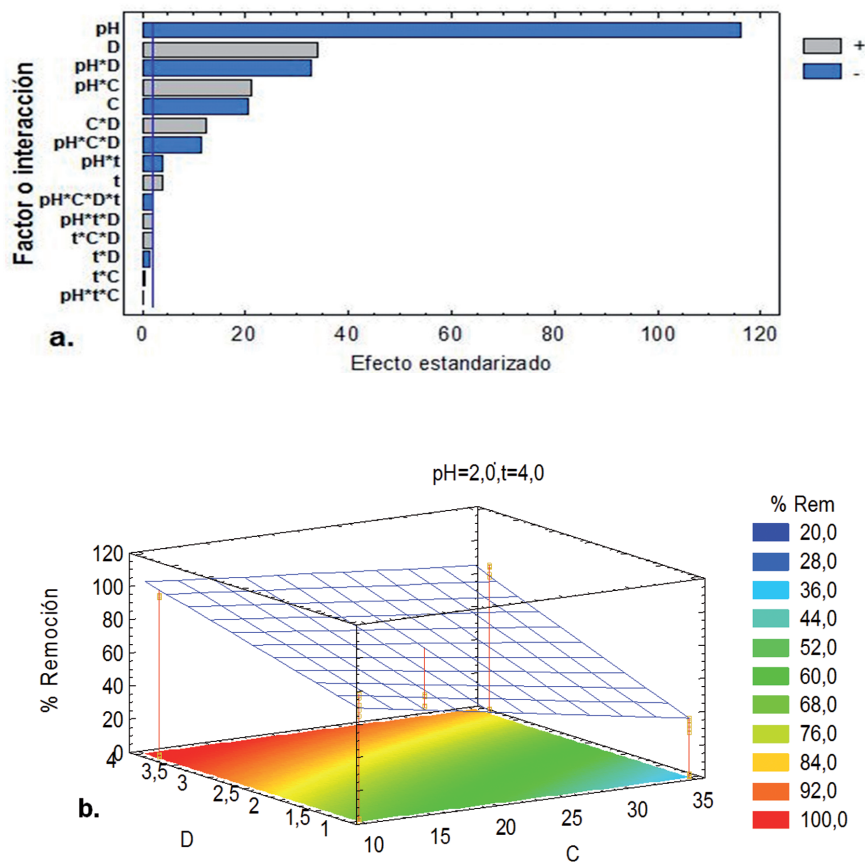
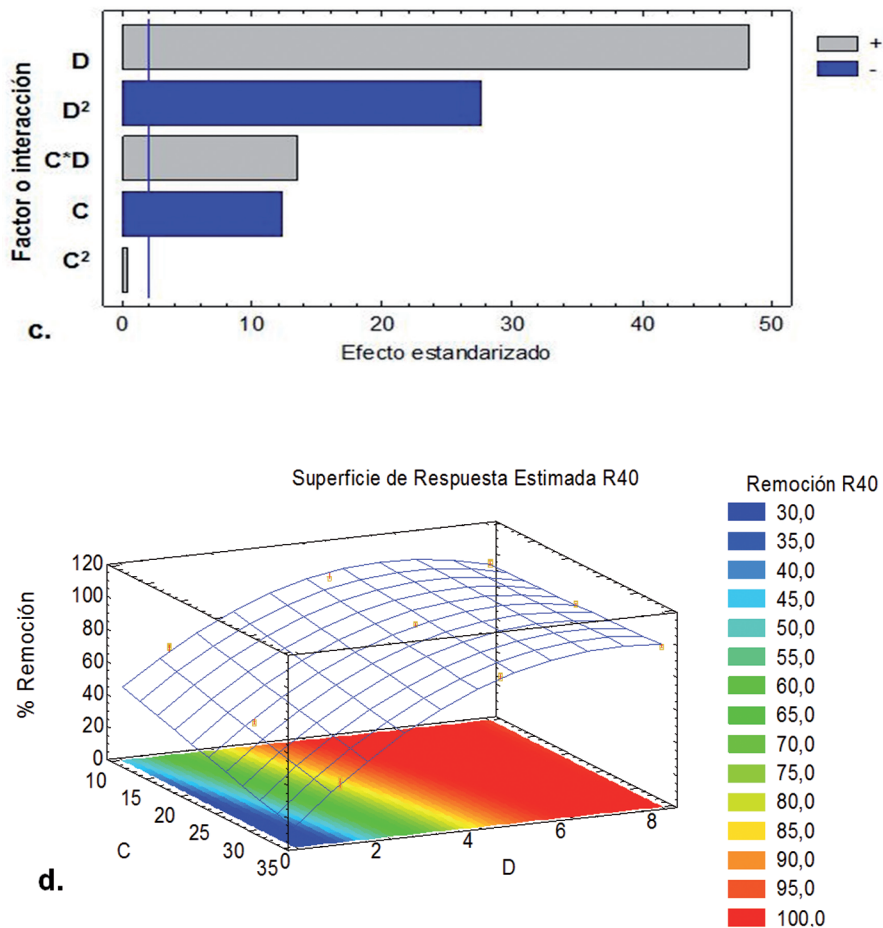


Figura 2. a) Diagrama de Pareto estandarizada para R40 diseño factorial 2<sup>4</sup>. b) Superficie de respuesta estimada a pH 2 y t: 4 h diseño factorial 2<sup>4</sup>. c) Diagrama de Pareto estandarizada para R40 superficie de respuesta. d) Superficie de respuesta estimada R40, C (ppm) y D (g/L) diseño superficie de respuesta.





**Figura 2. a) (continuación). Diagrama de Pareto estandarizada para R40 diseño factorial 2<sup>4</sup>. b) Superficie de respuesta estimada a pH 2 y t: 4 h diseño factorial 2<sup>4</sup>. c) Diagrama de Pareto estandarizada para R40 superficie de respuesta. d) Superficie de respuesta estimada R40, C (ppm) y D (g/L) diseño superficie de respuesta.**

En el diagrama de Pareto, se puede observar que los factores pH, t, D, C y las interacciones pH\*D, pH\*C, C\*D, pH\*C\*D y pH\*t fueron significativos con una probabilidad del 5 % ( $p < 0.005$ ). Por otro lado, las interacciones de pH\*t\*C\*D, pH\*t\*D, t\*C\*D, t\*D, t\*C y pH\*t\*C resultaron ser estadísticamente poco significativas. El efecto negativo para el factor pH indica que un aumento en la remoción se alcanza para valores bajos de pH; un comportamiento similar se aprecia para la concentración inicial; en tanto que para los factores D y t, se registra un efecto positivo, señalando que un aumento de sus valores permite alcanzar mayores porcentajes de remoción.

En la superficie de respuesta estimada se observa un comportamiento lineal de la remoción del R40 a un pH = 2.0 y tiempo de 4 min, alcanzando remociones del 100% a dosis altas del adsorbente y concentraciones bajas del colorante. Sin embargo, el pH es la variable más significativa y determinante del proceso, ya que la adsorción de este colorante sobre TM solo se alcanza a un pH ácido de 2.0 (figura 3). El tiempo de contacto no es una variable determinante y, por lo tanto, se decidió fijarla como constante (2 h) para el siguiente ensayo estadístico.

Si bien el modelo tiene un buen coeficiente de correlación ajustado al 99.73%, es necesario analizar el gráfico de probabilidad normal para residuos, ya que se debe mostrar un comportamiento lineal en su probabilidad, teniendo en cuenta el no sesgo del método (figura 4a). El sesgo se define como la desviación o diferencia de los resultados obtenidos con respecto al valor aceptado como referencia o valor verdadero. El sesgo es una expresión de la inexactitud del método, y representa el error sistemático total. Si se muestra tendencia lineal no hay sesgo en la medición<sup>19</sup>. En la figura 4a, se observa que los datos no representan una linealidad aceptable.

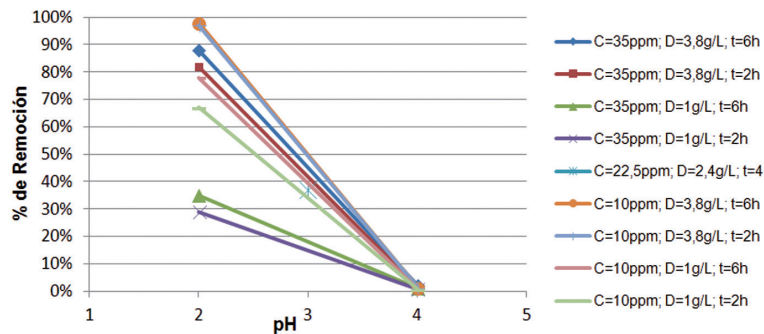


Figura 3. Influencia del pH respecto a todos los factores

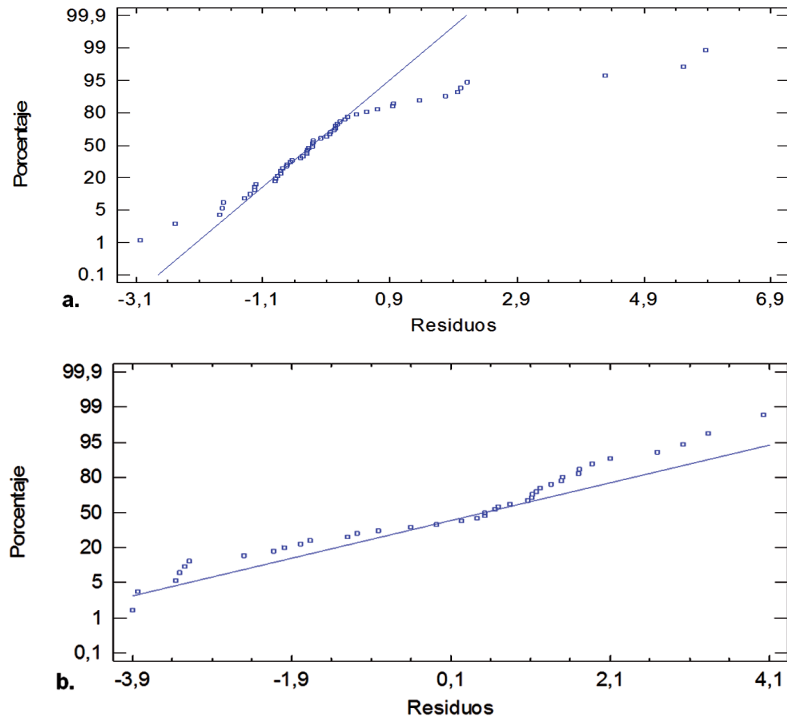


Figura 4. a) Probabilidad normal para residuos diseño factorial  $2^4$ .  
b) Probabilidad normal para residuos diseño superficie de respuesta



## Optimización de la remoción del RB40 a través de superficie de respuesta

Para llevar a cabo la optimización de la remoción de R40 sobre TM, se realizó un diseño de superficie de respuesta con 40 experimentos, conteniendo 8 puntos centrales. Los factores fueron seleccionados con base en el diseño factorial  $2^4$ , donde la concentración y la dosificación del adsorbente son las variables más determinantes del proceso. En la tabla I se observan los detalles del diseño. El modelo matemático obtenido para el diseño de superficie de respuesta fue:

$$\%Remoción = 59,3056 - 1,42924*C + 18,7951*D + 0,00196722*C^2 + 0,188849*C*D - 1,79826*D^2 \quad (3)$$

El análisis de varianza del diseño de superficie determina los factores importantes que afectan la remoción del colorante R40, dado por la suma de cuadrados utilizados para estimar los efectos de los factores y la razón-F, definida como la relación respectiva del cuadrado medio y el error cuadrático medio. Otro criterio importante es el valor-P, que establece que el principal efecto de cada factor y los efectos de interacción son estadísticamente significativos cuando  $P < 0.05$  (varianza del 95%)<sup>19</sup>. En este caso, cuatro efectos tienen un valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%.

El valor-P se puede visualizar del diagrama de Pareto (figura 2c), donde los factores D y C, como las interacciones DD y DC, fueron significativos con una varianza del 95%. Sin embargo, la variable más influyente sigue siendo la dosis de adsorbente, ya que es el factor más alejado de la línea del valor-P, mientras que la interacción de CC se encuentra por debajo de esta línea de varianza, la cual corresponde a un estimado de los errores de los efectos, y es no significativo. Es importante mencionar que los valores positivos de los efectos indican que al incrementar sus niveles, se alcanza un aumento en la respuesta (porcentaje de remoción), en tanto que los valores negativos de los efectos conducen a una disminución de la respuesta.

Además, el ajuste al modelo es un poco mayor y se demuestra una buena curvatura correspondiente al término cuadrático del modelo (ecuación 3), donde es representado por medio del coeficiente de correlación ( $R^2$  ajust.) del 98.97%.

La variable más influyente del proceso de adsorción es la dosificación del adsorbente, donde a mayor cantidad de adsorbente mejor remoción del colorante, (figura 2d), lo cual es acorde con el valor positivo de su coeficiente, donde su magnitud señala su importancia en el proceso (figura 2c).

En la figura 2d se puede visualizar el contorno de la variable respuesta para la dosificación del adsorbente D ( $\text{gL}^{-1}$ ) contra concentración del colorante C ( $\text{mgL}^{-1}$ ), alcanzando porcentajes de remoción altos, mayores del 95% aproximadamente con valores de dosificación del adsorbente superiores a  $4.0 \text{ gL}^{-1}$  y valores de concentración de colorante bajos. Sin embargo, la concentración de colorante entre  $10$  y  $35 \text{ mgL}^{-1}$  no aumentó el porcentaje de remoción significativamente, debido a que el efecto más importante fue la dosis de la TM.

La remoción del R40 utilizando TM se ajusta al modelo de la ecuación 3, la cual es válida para un intervalo de C entre  $10$  y  $35 \text{ mgL}^{-1}$ , D entre  $1.0$  y  $8.0 \text{ gL}^{-1}$ ,  $\text{pH} = 2.0$ , velocidad de agitación de  $120 \text{ rpm}$  y a temperatura ambiente ( $25^\circ\text{C}$ ). El valor óptimo alcanzado para la remoción fue del 100%, con una D de  $8.0 \text{ gL}^{-1}$  y una C de  $35 \text{ mgL}^{-1}$ .

Para verificar el comportamiento adecuado de la probabilidad normal para residuos se debe evidenciar una tendencia lineal (figura 4b). Sin duda, en la figura se observa una tendencia de linealidad a lo largo de los residuos, ratificando el no sesgo en la medición, es decir, no hay indicación de una correlación apropiada en los residuos con un nivel de significancia de 5.0%.

Es valioso señalar que el material cargado de colorante es sometido a un proceso de desorción para su reutilización o alternativamente experimenta un tratamiento biológico de biorremediación.

## CONCLUSIONES

La tusa de maíz mostró una alta eficiencia en la remoción del colorante ácido R40, señalando su naturaleza apropiada como adsorbente alternativo para el tratamiento de efluentes coloreados.

El diseño factorial completo de cribado  $2^4$  permitió puntualizar los factores más influyentes en la adsorción del R40 sobre TM, donde las mejores condiciones se alcanzaron a un pH ácido ( $\text{pH} = 2.0$ ), dosificación del adsorbente  $3.8 \text{ g L}^{-1}$ , concentración de colorante  $10 \text{ mgL}^{-1}$  y tiempo de contacto de 2 h. El pH fue la variable más significativa y el coeficiente de correlación ajustado  $R^2_{\text{ajust}} = 99.72\%$ .

Por su parte, el diseño de superficie de respuesta representa mucho mejor el proceso de adsorción, con un coeficiente de correlación ajustado,  $R^2_{\text{ajust}} = 98.98\%$  y ausencia de sesgo en su medición para la representación lineal de sus residuales. Las condiciones óptimas de este modelo consideran una dosificación del adsorbente de  $7.9 \text{ g L}^{-1}$  y una concentración de colorante de  $35 \text{ mgL}^{-1}$ , con valor de pH constante ( $\text{pH} = 2.0$ ) y el tiempo de contacto de 2 h.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia –Sede Medellín– por el apoyo a través de la infraestructura del Laboratorio de Química Experimental y a COLCIENCIAS por la financiación del Proyecto Código 1118-489-25228.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. TURABIK, M. Adsorption of basic dyes from single and binary component systems onto bentonite: simultaneous analysis of Basic Red 46 and Basic Yellow 28 by first order derivative spectrophotometric analysis method. En: Journal of hazardous materials. October 2008. Vol. 158, No. 1. p. 52-64.
2. ROBINSON, T.; CHANDRAN, B. & NIGAM, P. Removal of dyes from a synthetic textile dye effluent by biosorption on apple pomace and wheat straw. En: Water research. June 2002. Vol. 36, No. 11. p. 2824-2830.
3. AKSU, Z. & ISOGLU, I. A. Use of agricultural waste sugar beet pulp for the removal of Gemazol turquoise blue-G reactive dye from aqueous solution. En: Journal of hazardous materials. September 2006. Vol. 137, No. 1. p. 418-430.
4. GUPTA, V.K. & SUHAS. Application of low-cost adsorbents for dye removal -- a review. En: Journal of environmental management. June 2009. Vol. 90, No. 8. p. 2313-2342.
5. FORGACS, E.; CSERHÁTI, T. & OROS, G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. En: Environment international. September 2004. Vol. 30, No. 7. p. 953-971.
6. ALEMÁN, A.; HORMAZA, A. & ÁLVAREZ, M. Remoción de rojo básico de un efluente textil simulado : un caso de aplicación de la cascarilla de arroz. En: Producción + Limpia. Enero 2011. Vol. 6, No. 1. p. 66-75.
7. TOKUMURA, M.; ZNAD, H.T. & KAWASE, Y. Decolorization of dark brown colored coffee effluent by solar photo-Fenton reaction: Effect of solar light dose on decolorization kinetics. En: Water Research. November 2008. Vol. 42, No. 18. p. 4665-4673.
8. RAFATULLAH, M.; et al. Adsorption of methylene blue on low-cost adsorbents: a review. En: Journal of hazardous materials. May 2010. Vol. 177, No. 1-3. p. 70-80.

9. MAJCEN-LE MARECHAL, A.; SLOKAR, Y.M. & TAUFER, T. Decoloration of chlorotriazine reactive azo dyes with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. En: Dyes and Pigments. April 1997. Vol. 33, No. 4. p. 281-298.
10. AKSU, Z. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. En: Process Biochemistry. March 2005. Vol. 40, No. 3-4. p. 997-1026.
11. SCHRANK, S.G.; *et al.* Decolourisation effects of Vat Green 01 textile dye and textile wastewater using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV process. En: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. February 2007. Vol. 186, No.2-3. p. 125-129.
12. NIGAM, P.; *et al.* Physical removal of textile dyes from effluents and solid-state fermentation of dye-adsorbed agricultural residues. En: Bioresource. May 2000. Vol. 72, No. 3. p. 219-226.
13. MOHAN, D. & PITTMAN, C.U. Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water. En: Journal of hazardous materials. September 2006. Vol. 137, No. 2. p. 762-811.
14. AKSU, Z.; TATLI, A. İ. & TUNÇ, Ö. A comparative adsorption/biosorption study of Acid Blue 161: Effect of temperature on equilibrium and kinetic parameters. En: Chemical Engineering Journal. August 2008. Vol. 142, No. 1. p. 23-39.
15. CRINI, G. Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: a review. En: Bioresource technology. June 2006. Vol. 97, No. 9. p. 1061-1085.
16. SRINIVASAN, A. & VIRARAGHAVAN, T. Decolorization of dye wastewaters by biosorbents: a review. En: Journal of environmental management. October 2010. Vol. 91, No. 10. p. 1915-1929.
17. SUÁREZ, E., HORMAZA, A. Estudio del proceso de biosorción de dos colorantes estructuralmente diferentes sobre residuos avícolas. En: Revista de la Sociedad Química del Perú. Julio 2009. Vol. 75, No. 3. p. 329-338.
18. SOYLAK, M., UNSAL, Y.E. & TUZEN, M. Spectrophotometric determination of trace levels of allura red in water samples after separation and preconcentration. En: Food and chemical toxicology. February. Vol. 49, No. 5. p. 1183-1187.
19. MONTGOMERY, D.C. Design and analysis of experiments. 5 ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2005. 643 p.
20. LOPEZ, B.; TORRES, R. & PEÑUELA, G. Solar photocatalytic treatment of carbofuran at lab and pilot scale: Effect of classical parameters, evaluation of the toxicity and analysis of organic by-products. En: Journal of Hazardous Materials, July 2011. Vol. 191, No.1-3. p. 196-203.
21. OFICIAL METHODS OF ANALYSIS OF AOAC INTERNATIONAL (AOAC). Official Methods of Analysis 2002.04. 5 ed. Washington D.C: Kenneth Helrich, 1990. p 62.
22. SUN, R. Fractional and structural characterization of hemicelluloses isolated by alkali and alkaline peroxide from barley straw. En: Carbohydrate polymers. September 2002. Vol. 49, No. 4. p. 415-423.