



Evaluación de residuos de raquis de palma de aceite como adsorbente para la remoción de tintes reactivos de soluciones acuosas

Evaluation of oil palm empty fruit bunch wastes as adsorbent for the removal of reactive dyes from aqueous solutions

Pineda-Ayala David Moisés †
Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras
Departamento de Ingeniería Química
<https://orcid.org/0000-00>

Durán-Herrera José Esteban
Universidad de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Química
Correo: esteban.duranherrera@ucr.ac.cr
<https://orcid.org/0000-0001-7382-0454>

Resumen

En esta investigación se evaluaron residuos de raquis de palma de aceite (*Elaeis guineensis*) como posible material adsorbente de tintes reactivos en aguas residuales. Se emplearon los tintes reactivos amarillo 254 (RY254), naranja 122 (RO122) y negro 5 (RB5) como tintes contaminantes modelo. La evaluación del raquis se realizó con y sin pretratamiento químico (hidrólisis con NaOH y solo lavado con agua) y a diferentes condiciones de operación (pH, relación adsorbente-adsorbato y concentración inicial de tinte). Adicionalmente, se determinaron los puntos isoeléctricos de los tintes y el punto de carga cero del adsorbente. Se determinó que la mejor adsorción por parte del raquis se da cuando el único pretratamiento que recibe es un lavado con agua hirviendo. Asimismo, las condiciones de operación que más favorecieron la capacidad de adsorción del raquis fueron un pH de 3, una concentración de tinte de 20 mg/L y una concentración de raquis de 0.5 g por cada 100 mL de solución tratada; bajo estas condiciones se obtuvieron capacidades de adsorción entre 2.4-3.3 mg/g y porcentajes de remoción de los tintes entre 60-85%. Los puntos isoeléctricos obtenidos para los tintes RY254, RO122 y RB5 fueron respectivamente, 5.88, 5.92 y 6.45. De igual forma, el punto de carga cero del raquis se estimó en pH=6.1. La capacidad de adsorción del raquis se reduce considerablemente a valores de pH neutros (particularmente entre 5.8 y 6.5) debido a la coincidencia de los puntos isoeléctricos de los tintes reactivos estudiados y el potencial de carga cero del raquis en ese ámbito. De este estudio se concluye que el raquis de palma posee buenas características para ser utilizado como material adsorbente de tintes textiles.

Descriptores: Adsorción, tintes reactivos, raquis de palma de aceite, contaminación, purificación de agua.

Abstract

In this research, oil palm empty fruit bunch (OPEFB) wastes (*Elaeis guineensis*) were evaluated as potential adsorbent material of reactive dyes in wastewaters. Reactive dyes yellow 254 (RY254), orange 122 (RO122) and black 5 (RB5) were used as model contaminant dyes. OPEFB evaluation was performed with and without chemical pre-treatment (NaOH hydrolysis and water-only washing) and under different operating conditions (pH, adsorbent-adsorbate ratio, and initial concentration of dye). Additionally, the isoelectric points of the dyes and the zero charge point of the adsorbent were determined. It was found that best adsorption occurs when OPEFB is just washed with boiling water as pre-treatment. The operating conditions that favored the adsorption capacity were pH=3, dye concentration of 20 mg/L and OPEFB concentration of 0.5 g per 100 mL of treated solution; under these conditions, adsorption capacities of 2.4-3.3 mg/g and dye removal of 60-85% were obtained. The isoelectric points obtained for RY254, RO122 and RB5 dyes were 5.88, 5.92 and 6.45, respectively. The point of zero charge of OPEFB was estimated at pH=6.1. The OPEFB adsorption capacity is considerably reduced at neutral pH values (particularly between 5.8 and 6.5) due to the coincidence of the isoelectric points of the reactive dyes studied and the zero-charge potential of the OPEFB in that range. From this study it is concluded that OPEFB has good characteristics to be used as an adsorbent material for textile dyes.

Keywords: Adsorption, reactive dyes, oil palm empty fruit bunch, contamination, water purification.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua con tintes se puede producir debido a actividades de las industrias textil, papelera, cosmética, curtiembre, alimenticia, fabricación de pinturas, electrodeposición, galvanizado, farmacéuticas, entre otras. La industria textil es considerada como la mayor consumidora de tintes sintéticos, requiriendo alrededor de 60-70% de todas las sustancias teñidas, en conjunto con diversos reactivos auxiliares utilizados en procesos de teñido, impresión y acabado (Molen, 2008, citado en Beekaroo y Mudhoo, 2011). Del total de tintes empleados, cerca de 20-50% puede terminar en las aguas residuales, esto dependiendo del tipo de tinte, ruta de aplicación y profundidad de la sombra requerida (Kansal *et al.*, 2006, citado en Beekaroo & Mudhoo, 2011). Los tintes, al ser intensamente coloreados, poco biodegradables y tóxicos, generan múltiples inconvenientes si son descargados a cuerpos receptores sin su debido tratamiento. Además de problemas estéticos, las aguas residuales con tintes son tóxicas, interrumpen la cadena alimenticia acuática y provocan reducción de la penetración de luz solar afectando la fotosíntesis de la vegetación acuática (Al-Degs *et al.*, 2008). Aunque algunos de estos tintes por sí mismos no sean tóxicos, pueden convertirse en aminas potencialmente carcinogénicas después de su liberación a ambientes acuáticos, además de la posibilidad de causar destrucción de la vida acuática debido a la presencia de cloruros aromáticos y metálicos que interfieren con el oxígeno en cuerpos de agua (Beekaroo y Mudhoo, 2011).

En años recientes, se ha realizado investigación en el área de tratamiento de aguas residuales contaminadas con tintes, principalmente porque los métodos convencionales de tratamiento basados en biodegradación aerobia han mostrado ser ineficientes para la completa eliminación de muchos de estos tintes reactivos (Al-Degs *et al.*, 2008). Una alternativa para la remoción de estos contaminantes es la adsorción de estas moléculas en algún material sólido. Adsorbentes tales como el carbón activado están disponibles comercialmente, sin embargo, su costo es elevado, no es selectivo y su regeneración es costosa, complicada y resulta en pérdidas del mismo (Babel y Kurniawan, 2003, citado en Crini, 2006). Esto ha llevado a la necesidad de investigar adsorbentes más económicos, donde la utilización de materiales residuales de las actividades agroindustriales han sido una buena opción. Un adsorbente adecuado para la remoción de tintes debe cumplir varios requisitos:

1. Eficiencia para remoción de una amplia variedad de tintes.

2. Alta capacidad y velocidad de adsorción.
3. Alta selectividad para diferentes concentraciones.
4. Tolerancia bajo un amplio intervalo de parámetros de agua residual.
5. Bajo costo.

Cada adsorbente tiene sus características físicas y químicas específicas (tales como porosidad, área superficial y fuerza física), las cuales determinan su eficiencia; además, las capacidades de adsorción de los adsorbentes pueden variar dependiendo de las condiciones experimentales (Crini, 2006).

Entre los adsorbentes alternativos de bajo costo investigados por diversos autores, se tiene el raquis de la palma de aceite *Elaeis guineensis*. En el proceso de extracción del aceite se obtienen como subproductos el raquis (eje de donde brotan los racimos), las fibras de los frutos y el cuesco de las nueces. En Latinoamérica, estos residuos típicamente son depositados al pie de las palmas, estos al descomponerse aportan nutrientes al suelo. De acuerdo con datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica (Quesada, 2008), el raquis contiene 2.26 mg/kg de nitrógeno total, 2.45 mg/kg de potasio y 4.90 mg/kg de fósforo total. Sin embargo, el abandonar estos residuos al aire libre puede generar suciedad y riesgo de plagas (Law *et al.*, 2007). El residuo de raquis de palma de aceite es un material lignocelulósico no maderable con tipo de célula, morfología y composición química complicados. Luego de análisis microscópico SEM, Law *et al.* (2007) encontraron presencia de gránulos de almidón en el interior del haz vascular, confirmado cualitativamente usando disolución de yodo. Además de sus componentes orgánicos, el raquis es rico en elementos inorgánicos, como sílice y metales. Law *et al.* (2007) encontraron que los filamentos de la fibra de raquis tienen una estructura única entre los materiales con fibras aprovechables. Dichos filamentos poseen muchos elementos en forma de recipiente con diámetro y longitud relativamente grandes en su región central, rodeados por fibras vasculares. Estas fibras vasculares tienen numerosos cuerpos de sílice adheridos a cráteres en sus superficies; los cráteres están perforados hasta el fondo, y muchos otros minerales están también presentes en los filamentos. Observaciones microscópicas sugieren que los cuerpos de sílice están conectados a una red de caminos silíceos dentro de la matriz fibrosa, y que los minerales tienden a concentrarse adyacentes a los cuerpos de sílice.

Los residuos de palma de aceite que se han investigado para adsorción de metales pesados y colorantes en agua son las fibras de semilla, tronco y hojas. Algunos de los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 1.

Sin embargo, no es de conocimiento de los autores que los residuos de raquis propiamente se hayan investigado como adsorbentes de tintes reactivos; no obstante, sí el carbón activado obtenido a partir de ellos (Abd *et al.*, 2017; Osman *et al.*, 2016). En esta investigación se evaluó la capacidad de los residuos de raquis para remover tintes reactivos, utilizando tres tintes como moléculas modelo (negro 5, amarillo 254 y anaranjado 122). La evaluación se realizó practicándole pretratamiento químico (hidrólisis con NaOH) al raquis y bajo diferentes condiciones de operación (pH, relación adsorbente-adsorbato y concentración inicial de tinte). Adicionalmente, para analizar adecuadamente los resultados, se determinaron los puntos isoeléctricos de los tintes y el punto de carga cero del adsorbente.

MATERIALES Y MÉTODOS

ADSORBATO

Se seleccionaron tres tintes reactivos (Tabla 2) tipo colorante azo fabricados por Colorant Limited (Ahmedabad, India), con estructuras moleculares mostradas en la Figura 1. El tinte negro reactivo 5 (RB5) se seleccionó porque aparece incluido en el listado de la Asociación Ecológica y Toxicológica de Fabricantes de Tintes y Pigmentos Orgánicos (ETAD por sus siglas en inglés) como sensibilizante cutáneo/respiratorio (Gregory, 2007). Los tintes reactivos amarillo 254 (RY254) y anaranjado 122 (RO122) se seleccionaron para considerar los efectos de diversos grupos funcionales.

Tabla 1. Capacidad de adsorción de contaminantes presentes en agua, reportada como Q_{max} (mg/g), usando diferentes residuos de palma de aceite como adsorbente

Adsorbente	Contaminante	Q_{max}	Fuente
Fibra de semilla	Plomo (II)	49.9	Ho y Ofomaja (2005)
Fibra de semilla	Cobre (II)	9.2	Ho y Ofomaja (2006)
Fibra de hojas	Zinc (II)	9.6	Salamatinia <i>et al.</i> (2007)
Fibra de hojas	Cobre (II)	10.4	Salamatinia <i>et al.</i> (2007)
Fibra de tronco	Verde de malaquita	149.6	Hameed y El-Khaiary (2008)
Fibra de semilla	Sulfato de 4-bromoanilina-1,8-dihidronaftaleno-3,6-disodio	38.6	Ho y Ofomaja (2007)
Fibra de semilla	Azul de metileno	671.6	Ofomaja (2008)

Tabla 2. Tintes reactivos utilizados en esta investigación (Colorant Limited, 2006a,b,c)

Nombre comercial	Nombre C.I.	Número CAS	Nomenclatura
Colron Yellow SD	Amarillo Reactivo 254	178198-11-3	RY254
Colron Orange SF	Naranja Reactivo 122	79809-27-1	RO122
Colron Navy Blue HE2R	Negro Reactivo 5	161935-19-9	RB5

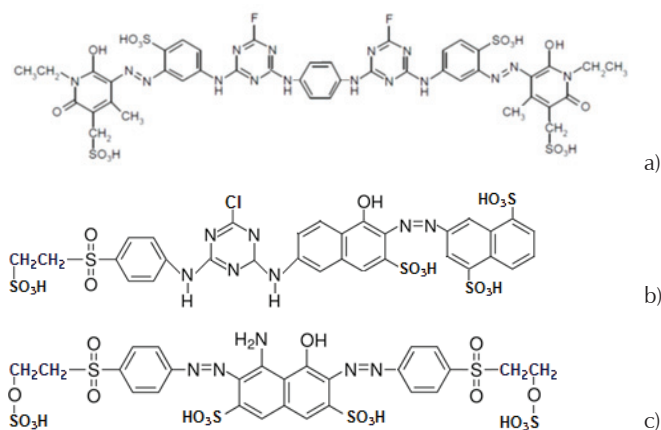


Figura 1. Estructuras moleculares de tintes reactivos, a) RY254, b) RO122 y c) RB5

Las concentraciones de cada tinte en fase acuosa se calcularon luego de medir la absorbancia con un colorímetro de un haz (HACH, Modelo Odyssey DR/2010, USA). Basado en los espectros de radiación en intervalo de luz visible, los parámetros espectrofotométricos para los tintes reactivos se detallan en el Tabla 3. Los límites de detección fueron calculados siguiendo el método expuesto por Eurachem (1998).

ADSORBENTE

Para esta investigación se empleó raquis de palma de aceite (*Elaeis guineensis*), residuo de producción de aceite (Compañía Palma Tica S.A., Coto Brus, Puntarenas). En todos los experimentos, el raquis se cortó en filamentos de 1 cm de longitud, se mezcló con agua de tubo y se hirvió por 15 min para retirar residuos de aceite. Se descartó el líquido y luego el raquis se lavó con agua de tubo y se secó por 4 h a 95 °C.

PUNTO ISOELÉCTRICO DE LOS TINTES REACTIVOS

El punto isoeléctrico se determinó mediante tres réplicas de una valoración potenciométrica ácido-base usando disoluciones estándar de NaOH y H₂SO₄ ambas 0.1 N, realizadas a 50 mL de disoluciones 100 mg/L de cada tinte reactivo. Debido a sus propiedades ácido-base, el punto isoeléctrico de los tintes reactivos corresponde al

punto final en una valoración mediante método potenciométrico (Al-Degs *et al.*, 2008). En el punto final, la segunda derivada es cero para una ecuación que describa la curva de volumen de valorante en eje de abscisas y el pH en eje de ordenadas (Ayres, 1970).

PRETRATAMIENTO QUÍMICO DEL RAQUIS

Se hirvieron 10 g de filamentos de raquis por 5 min en 1 L de disolución para digestión de NaOH (0; 0.01 y 0.1 N). Se descartó el líquido y el raquis se lavó con sucesivas porciones de agua de tubo hasta obtener un pH entre 7 y 8. Luego, en una Orbital Shaking Incubator (Lab-Line, modelo 4628, India), se agitó 0.5 g de raquis previamente digeridos con 100 mL de disolución de tinte por 16 h a 150 rpm y temperatura ambiente. Se filtró con papel filtro cualitativo retención media, y se midió el pH y la absorbancia en la longitud de onda de máxima absorción para cada tinte reactivo, utilizando agua destilada como blanco y disolución de tinte sin adsorber como referencia.

POTENCIAL DE CARGA CERO DEL RAQUIS

Se adicionó 0.5 g de raquis a una disolución de NaCl 0.01 M y se realizó una valoración potenciométrica con dos réplicas, utilizando disoluciones estándar de NaOH y H₂SO₄ ambas 0.1 N. Se repitió todo el procedimiento,

Tabla 3. Caracterización espectrofotométrica de los tintes reactivos. C es la concentración de tinte reactivo en la disolución (mg/L), A es la absorbancia, m es la pendiente, b es el intersección de las líneas de ajuste en cumplimiento de la ley de Lambert-Beer y R² es el coeficiente de correlación para el método de mínimos cuadrados

Tinte reactivo	Longitud de onda máxima (nm)	Parámetros de línea de ajuste C = m · A + b			Absortividad (m ² /kg)	Límite de detección (mg/L)	Intervalo de trabajo (mg/L)
		m (mg/L)	b (mg/L)	R ²			
RY254	425	47.95	-1.541	0.999 2	1 574	0.350	4 – 60
RO122	490	43.52	-0.019	0.999 9	1 734	0.240	4 – 40
RB5	620	30.45	-0.367	0.999 7	2 479	0.089	1 – 35

Tabla 4. Matriz del diseño experimental utilizado para analizar los efectos e interacciones del pH, relación masa de raquis/volumen de tinte y concentración inicial de tinte sobre la capacidad de adsorción

Tratamiento	Niveles	Identificación
pH	3	P-
	9	P+
Relación masa de raquis / volumen de tinte	0.5 g/100 mL	R-
	1.0 g/100 mL	R+
Concentración inicial de tinte	10 mg/L	Q-
	20 mg/L	Q+

pero adicionando 0.5 g de raquis en disolución de NaCl 1 M. El procedimiento se hizo por duplicado.

EFFECTOS DE PH, RELACIÓN ADSORBENTE-ADSORBATO Y CONCENTRACIÓN INICIAL DE TINTE SOBRE LA ADSORCIÓN

Mediante un diseño experimental factorial del tipo 2³ con 2 repeticiones (detallado en el Tabla 4), se investigaron los efectos del pH, la relación adsorbente-adsorbato y la concentración inicial de tinte sobre la adsorción de los tintes reactivos en el raquis de palma de aceite.

Los matraces con el raquis son montados en secuencias aleatorias en la Orbital Shaking Incubator (Lab-Line, modelo 4628, India), programada a 120 rpm por 16 h. Luego se filtran con papel filtro rápido y al filtrado se mide absorbancia a su respectiva longitud de onda, pH y conductividad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PUNTO ISOELECTRICO DE LOS TINTES REACTIVOS

La carga neta de una molécula se afecta por el pH del ambiente que le rodea y puede cargarse positiva o negativamente de acuerdo con la ganancia o pérdida de protones, respectivamente. El punto isoelectrico es el valor de pH en el cual la carga eléctrica de una entidad elemental es cero (McNaught y Wilkinson, 1997). Si la interacción electrostática fuera el único mecanismo para la adsorción de tintes reactivos, la capacidad de remoción sería máxima en un intervalo de pH donde la superficie del adsorbente esté negativamente cargada, mientras que las moléculas de tinte estén cargadas positivamente, o viceversa. En los tintes reactivos investi-

gados, los grupos que liberan protones son los grupos sulfonilo ($-SO_3H$) y algunos átomos de nitrógeno protonables no involucrados con sistemas aromáticos, por lo cual a condiciones de pH menores al punto isoelectrico se espera aumento de cargas positivas, mientras que a valores mayores que el punto isoelectrico se da aumento de cargas negativas en las partículas de tinte (Al-Degs *et al.*, 2008). Además del mecanismo electrostático, las interacciones entre el tinte y el adsorbente son causadas por puentes de hidrógeno y competencia hidrofóbica-hidrofílica.

A partir de los datos de la valoración potenciométrica, se genera un gráfico de cantidad de cargas eléctricas por masa de tinte reactivo en función del pH (Figura 2). Las cargas eléctricas positivas corresponden a meq-g de H^+ , y las cargas negativas a meq-g de OH^- . El punto isoelectrico se identifica como el intersepto de cada curva con el eje de las abscisas. De los resultados obtenidos, se concluyó que los puntos isoelectricos para los tintes RY254, RO122 y RB5 son respectivamente, 5.88, 5.92 y 6.45.

Los puntos de equilibrio ácido-base están influidos por la naturaleza de los grupos funcionales que consumen protones H^+ (bases de Brønsted-Lowry) o que liberan protones H^+ (ácidos de Brønsted-Lowry). Dado que los tintes reactivos contienen varios grupos funcionales, se pueden estudiar tomando en cuenta el punto isoelectrico, de manera similar a las proteínas. Para cada tinte reactivo, se observa que para valores de pH mayores que el punto isoelectrico, hay un aumento leve en la cantidad de sitios activos con carga negativa (OH^-). Sin embargo, para valores de pH menores al punto isoelectrico, se presenta un aumento más considerable de sitios activos con carga positiva (H^+).

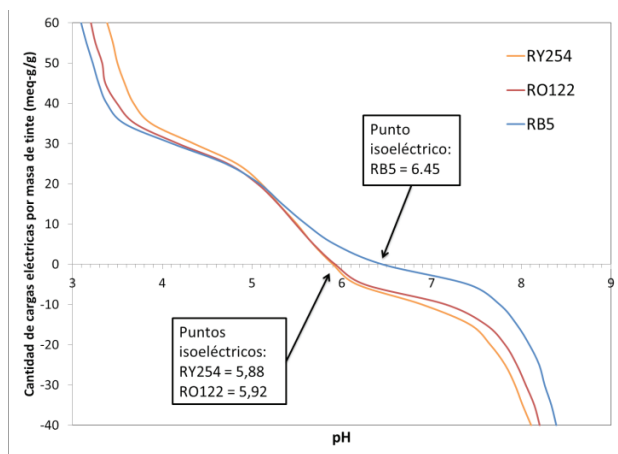


Figura 2. Curvas de valoraciones potenciométricas para determinación de puntos isoelectricos de los tintes reactivos bajo investigación

PRETRATAMIENTO QUÍMICO DEL RAQUIS

De la Figura 3 se puede observar que hay una mayor adsorción de tintes para el caso sin pre-tratamiento químico (únicamente el raquis hervido en agua de tubo), comparado con las hidrólisis en disolución de NaOH. De acuerdo con Ofomaja (2007), la fibra de palma de aceite contiene grupos funcionales como ácidos carboxílicos, alcoholes, aminas, carbohidratos y aceite residual en su superficie que podrían incrementar la afinidad del material adsorbente hacia las moléculas orgánicas. La hidrólisis, sea ácida o básica, provoca un descenso en la cantidad total de hidroxilos y un incremento en la cantidad de grupos carbonilo y carboxilo presentes en los materiales lignocelulósicos (Dalimova, 2006). Al tener más grupos ionizables y grupos funcionales polares por mol de tinte reactivo, el RY254 se atrae con mayor fuerza a la superfi-

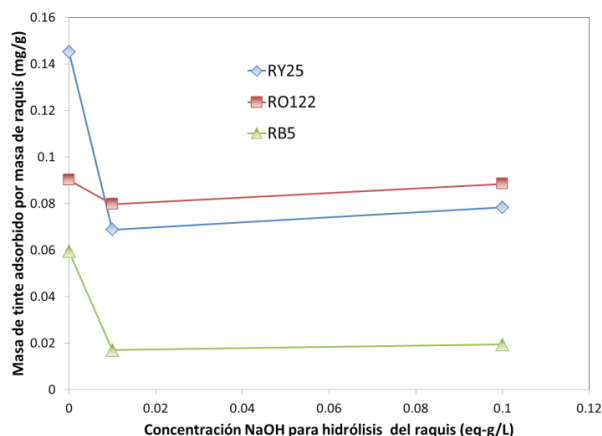


Figura 3. Valores promedio de masa adsorbida de tinte reactivo por masa de raquis en función de la concentración de NaOH utilizada en la hidrólisis del raquis como pretratamiento

cie del raquis, seguido por el RO122. Aunque el total de grupos funcionales ionizables y grupos funcionales polares es similar en el RO122 que en el RB5, se observa mayor capacidad de adsorción en el RO122 que en el RB5. Esto se debe a la presencia de halógenos en el RO122 versus ausencia de estos en el RB5, dado que estos halógenos son mayormente traídos electrostáticamente que otros elementos.

Dados estos resultados experimentales, para el resto de esta investigación se aplicó como pretratamiento al raquis únicamente el hervido con agua de tubo, con posterior lavado hasta no observar material suspendido en el agua de lavado. El hervido se aplica para eliminar restos de ácidos grasos y material soluble que disminuyen la superficie de contacto y que interfieren en las lecturas de absorbancia de los tintes reactivos.

POTENCIAL DE CARGA CERO DEL RAQUIS

Como indica Tombácz (2002), la mayor parte de un sólido en contacto con una fase acuosa adquiere una carga eléctrica superficial debido a la redistribución de especies cargadas en la región interfacial. Los iones adsorbidos pueden ligarse a la superficie (del adsorbente) a través de interacciones covalentes teniendo una influencia directa sobre la carga superficial. A partir de datos de retrovaloraciones potenciométricas ácido-base al adsorbente bajo diferentes concentraciones de un electrolito indiferente (ion espectador), se pueden representar como curvas de consumo neto de protones (expresada en mmol/g) en función de pH. Estas distintas curvas se intersectan en un punto común de pH que se denomina *punto de carga cero* (PZC por sus siglas en inglés), siendo este el punto de referencia para carga de

superficies. En la práctica, las curvas de valoración de consumo neto de protones versus pH se dirigen a la dirección positiva, cuando se adsorben especies catiónicas, y a la dirección negativa cuando se adsorben especies aniónicas. Los resultados obtenidos en la valoración potenciométrica para el intervalo de pH entre 5 y 8 durante la determinación del potencial de carga cero se representan en la Figura 4. Tomando el punto de carga cero como la intersección de esta curva en el eje de las abscisas, se identifica un valor de (6.1 ± 0.1) unidades de pH. Existe incremento de cargas positivas (adsorción de protones) en la superficie de raquis a medida que disminuye el pH, e incremento de cargas negativas (desorción de protones) al aumentar el pH. Lo anterior explica por qué se favorece la adsorción de aniones (como los tintes reactivos investigados) a medida que se va acidificando la disolución, y no es viable en el intervalo de pH entre 5.88 y 6.45, que incluye el potencial de carga cero del raquis y los puntos isoeléctricos de los tintes reactivos investigados.

EFFECTOS DE pH, RELACIÓN ADSORBENTE-ADSORBATO Y CONCENTRACIÓN INICIAL DE TINTE SOBRE LA ADSORCIÓN

Los resultados del diseño experimental realizado utilizando como variable respuesta la masa de tinte adsorbido por masa de raquis y el porcentaje de remoción del tinte reactivo desde la disolución a la superficie de raquis se muestran en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

Al analizar los efectos de las variables de estudio, se encontró que los tres son estadísticamente significativos a un nivel de confianza de 95%. Por ejemplo, usando como variable respuesta la masa de tinte adsorbido por masa de raquis, los efectos P, Q y R resultaron -1.60 , 0.77 y -0.63 mg/g respectivamente, para el tinte RY254; el comportamiento para los otros dos tintes fue similar. En general, el efecto del pH de la disolución (P) es el dominante y se obtuvo que al aumentarse, la adsorción del tinte disminuye. La misma tendencia ocurre cuando se aumenta la relación R. Por el contrario, cuando se aumenta el valor de la concentración de tinte (Q), la eficiencia de adsorción también aumenta. A pH 3, los porcentajes de remoción fueron muy buenos para los tintes RY254 y RO122 (80 – 95%), mientras que para RB5 fueron modestos (35 – 80%). A pH 9, los porcentajes de remoción fueron en promedio 10%. Las condiciones de operación que produjeron la mayor capacidad de adsorción del raquis fueron un pH de 3, una concentración de tinte de 20 mg/L y una concentración de raquis de 0.5 g por cada 100 mL de solución tratada, bajo las cuales se obtuvieron capacidades entre 2.4 – 3.3 mg/g y porcentajes de remoción de los tintes entre 60 – 85%.

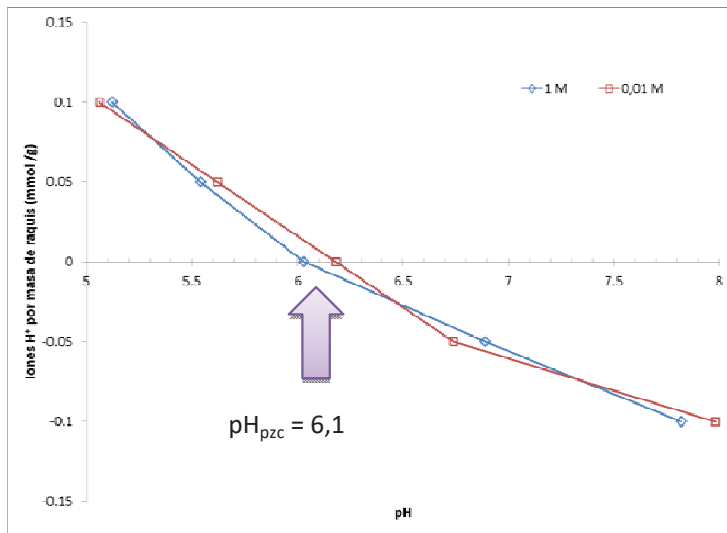


Figura 4. Cantidad de protones (H⁺) adsorbidos por masa de raquis durante una valoración potenciométrica

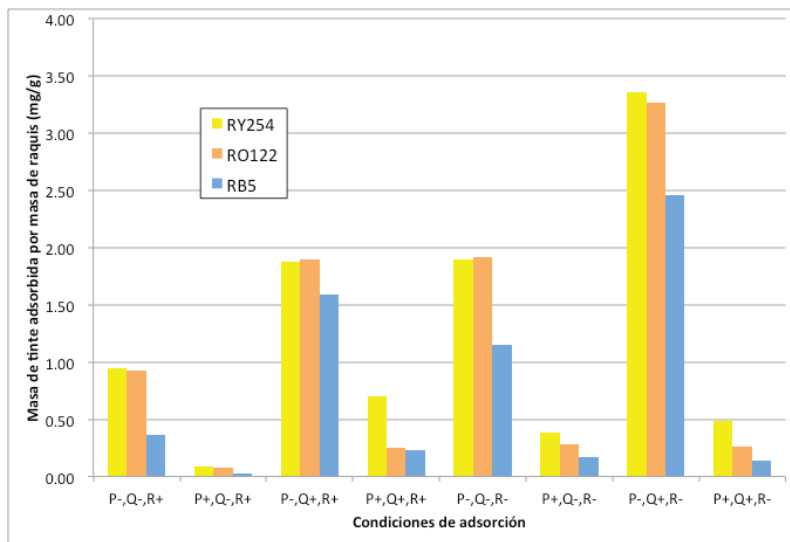


Figura 5. Adsorción de tintes reactivos bajo distintas condiciones de pH, concentración inicial de tinte y relación masa de raquis por volumen de disolución

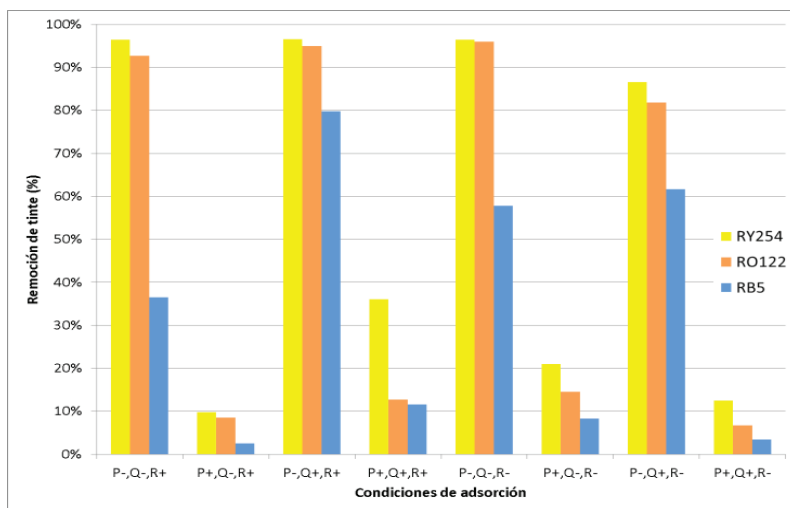


Figura 6. Porcentaje de remoción de tintes reactivos bajo diferentes condiciones de pH, concentración inicial de tinte y relación masa de raquis por volumen de disolución

De las Figuras 5 y 6 se deduce que la fracción de posiciones ocupadas por el adsorbato en el equilibrio es mayor en los tintes RY254 y RO122 que en el tinte RB5. Estas diferencias son posiblemente provocadas por la mayor fuerza de las atracciones entre las moléculas de tintes reactivos RY254 y RO122 y la superficie de raquis, que entre las moléculas de tinte RB5 y la superficie de raquis. Esa mayor fuerza en las atracciones en los tintes reactivos RY254 y RO122 es posiblemente debida a la presencia de átomos de halógenos en sus moléculas.

Con el fin de reconocer si la difusión de iones H⁺ desde el raquis es dependiente de la presencia del tinte reactivo para promover su intercambio iónico o únicamente del pH inicial del disolvente, se calculó la relación entre las diferencias de pH de disolución de tinte reactivo y agua destilada $[(pH_{final} - pH_{inicial})_{tinte} / (pH_{final} - pH_{inicial})_{agua}]$ al ponerlos en contacto con el raquis. Los resultados se muestran en el Tabla 5.

La diferencia $(pH_{final} - pH_{inicial})_{agua}$ indica difusión de los iones H⁺ presentes en la superficie del raquis hacia el agua destilada, es decir, independiente de la presencia del tinte reactivo para cada una de las condiciones del experimento 2³. La diferencia $(pH_{final} - pH_{inicial})_{tinte}$ indica intercambio iónico descrito como el desplazamiento de iones H⁺ desde el raquis hacia el agua, desplazamiento provocado por la adsorción de moléculas de tinte en la superficie de raquis. Por tanto, se espera que la relación $[(pH_{final} - pH_{inicial})_{tinte} / (pH_{final} - pH_{inicial})_{agua}]$ sea cercana a uno si la etapa determinante del mecanismo de adsorción es la difusión, y una relación más alejada de uno si existe una mayor dependencia de la difusión de iones H⁺ en el intercambio iónico con las moléculas de tinte reactivo. Como se observa en la Tabla 5, los resultados para la relación $[(pH_{final} - pH_{inicial})_{tinte} / (pH_{final} - pH_{inicial})_{agua}]$ son cercanos a uno para todos los tratamientos a pH 9, mientras que a pH 3 la misma

relación es más alejada de uno. Lo anterior indica que la difusión de iones H⁺ desde y hacia el raquis a pH 9 depende únicamente de la interacción con el disolvente (agua); mientras que a pH 3 el cambio de pH depende más del intercambio iónico con las moléculas de tinte reactivo que de una difusión de iones H⁺ dependiente únicamente del disolvente.

CONCLUSIONES

La hidrólisis del raquis de palma de aceite no provoca cambios significativos en su capacidad adsorptiva, por lo cual la eliminación de sustancias solubles en agua en ebullición es suficiente para garantizar la adsorción de tintes reactivos y así garantizar reducción de costos en el pretratamiento del raquis como adsorbente.

La capacidad de adsorción se reduce considerablemente a valores de pH neutros (particularmente entre 5.8 y 6.5) debido a la coincidencia de los puntos isoeléctricos de los tintes reactivos estudiados y el potencial de carga cero del raquis en ese ámbito; sin embargo, esta se incrementa en la medida que se disminuye el pH por el aumento de cargas positivas en el tinte reactivo disuelto y en incremento en la afinidad de la superficie del raquis por atraer especies cargadas positivamente.

Entre los efectos considerados, el pH de la disolución de tinte resultó con mayor significancia que el resto, siendo más eficiente en medio ácido que en medio básico. Una alta concentración inicial de tinte favorece la adsorción, de manera igual que una baja relación masa de raquis por volumen de disolución con tinte.

Con los resultados de este estudio se determina que el raquis de palma posee buenas características para utilizarse como material adsorbente de tintes textiles.

Tabla 5. Diferencias de pH de disolución de tinte reactivo y agua destilada al ponerse en contacto con el raquis, para cada tratamiento

Tratamientos			$[(pH_{final} - pH_{inicial})_{tinte} / (pH_{final} - pH_{inicial})_{agua}]$		
P	Q	R	RY254	RO122	RB5
-	-	+	0.06	-0.31	-0.69
+	-	+	1.42	1.03	0.90
-	+	+	0.01	-0.09	0.08
+	+	+	1.00	0.74	0.90
-	-	-	0.06	-0.30	-0.38
+	-	-	1.05	1.00	0.64
-	+	-	0.20	0.00	0.36
+	+	-	1.04	0.97	0.80

REFERENCIAS

- Abd, N.S., Nang, H.L., Loh, S.K., Aziz, A.A., Rahman, Z.A., y May, C.Y. (2017). Activated carbon from oil palm biomass as potential adsorbent for palm oil mill effluent treatment. *Journal of Oil Palm Research*, 29 (2): 278-290, <https://doi.org/10.21894/jopr.2017.2902.12>
- Al-Degs Y.S., El-Barghouthi M.I., El-Sheikh A.H., y Walker G.M. (2008). Effect of solution, pH, ionic strength, and temperature on adsorption behavior of reactive dyes on activated carbon. *Dyes and Pigments*, 77: 16-23, <https://doi.org/10.1016/j.dye-pig.2007.03.001>
- Ayres G. (1970). *Análisis Químico Cuantitativo* (2a ed.). México: Editorial Harla.
- Beekaroo D. y Mudhoo A. (2011). *Adsorption of reactive red 158 dye by chemically treated Cocos nucifera L. shell powder*. Dordrecht: Springer.
- Colorant Limited. (2006a). *Hoja de seguridad: Colron Yellow SD* (Versión española de acuerdo con la Directiva Comunitaria 93/112/CE). Ahmedabad, India: Colorant Limited.
- Colorant Limited. (2006b). *Hoja de seguridad: Colron Orange SF* (Versión española de acuerdo con la Directiva Comunitaria 93/112/CE). Ahmedabad, India: Colorant Limited.
- Colorant Limited. (2006c). *Hoja de seguridad: Colron Navy SD* (Versión española de acuerdo con la Directiva Comunitaria 93/112/CE). Ahmedabad, India: Colorant Limited.
- Crini G. (2006). Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. *Bioresource Technology*, 97: 1061-1085, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.05.001>
- Dalimova G.N. (2006). Modification of hydrolyzed lignin in acidic and basic media. *Chemistry of Natural Compounds*, 42(1): 88-91, <https://doi.org/10.1007/s10600-006-0042-5>
- Eurachem. (1998). *The fitness for purpose of analytical methods-A laboratory guide to method validation and related topics*. Teddington, Reino Unido: LGC. Recuperado de: <http://www.eurachem.org/guides/pdf/valid.pdf>
- Gregory P. (2007). *Toxicology of textile dyes*. En: Christie R.M., *Environmental aspects of textile dyeing* (pp. 44-73). Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing Limited.
- Hameed B., y El-Khaiary M. (2008). Batch removal of malachite green from aqueous solutions by adsorption on oil palm trunk fibre: Equilibrium isotherms and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 154: 237-244, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.017>
- Ho Y., y Ofomaja A. (2005). Kinetics and thermodynamics of lead ion sorption on palm kernel fibre from aqueous solution. *Process Biochemistry*, 40: 3455-3461, <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2005.02.017>
- Ho Y. y Ofomaja A. (2006). Kinetic studies of copper ion adsorption on palm kernel fibre. *Journal of Hazardous Materials*, B137: 1796-1802, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.023>
- Ho Y. y Ofomaja A. (2007). Equilibrium sorption of anionic dye from aqueous solution by palm kernel fibre as sorbent. *Dyes and Pigments*, 74: 60-66, <https://doi.org/10.1016/j.dye-pig.2006.01.014>
- Law K., Wand-Daud W., Ghazali A. (2007). Morphological and chemical nature of fiber strands of oil palm empty fruit bunches. *BioResources*, 2(3): 351-362.
- Quesada G. (2008). *Tecnología de palma aceitera: Cultivo e industria de la palma aceitera (Elaeis guineensis)*. San José, Costa Rica: Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. Recuperado de http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_palma.pdf
- McNaught D. y Wilkinson A. (1997). *IUPAC Compendium of chemical terminology* (2a ed). Oxford, Inglaterra: Blackwell Scientific Publications.
- Ofomaja A.E. (2007). Kinetics and mechanism of methylene blue sorption onto palm kernel fibre. *Process Biotechnology*, 42: 16-24, <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.07.005>
- Ofomaja A.E. (2008). Sorptive removal of Methylene blue from aqueous solution using palm kernel fibre: Effect of fibre dose. *Biochemical Engineering Journal*, 40: 8-18, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.11.028>
- Osman, N.B., Shamsuddina, N., Uemura, Y. (2016). Activated Carbon of Oil Palm Empty Fruit Bunch (EFB); Core and Shaggy. *Procedia Engineering*, 148: 758-764, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.610>
- Salamatinia B, Kamaruddin A.H., Abdullah A.Z. (2007). Removal of Zn and Cu from Wastewater by Sorption on Oil Palm Tree-Derived Biomasses. *Journal of Applied Sciences*, 7(15): 2020-2027, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.61010.3923/jas.2007.2020.2027>
- Tombácz, E. (2002). Adsorption from Electrolyte Solutions. En: Tóth J., *Adsorption: Theory, modeling and analysis*. Nueva York, Estados Unidos: Marcel Dekker, Inc.