



**EVALUACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE LLANTAS
USADAS PARA LA ADSORCIÓN EN MODO BATCH DE RODAMINA B, FENOL
Y METALES PESADOS**

**JHONATTAN JAVIER CARREÑO MONTIEL
CHRISTIAN JOSE SCHOTBORGH CARABALLO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2014**

**EVALUACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO A PARTIR DE LLANTAS
USADAS PARA LA ADSORCIÓN EN MODO BATCH DE RODAMINA B, FENOL
Y METALES PESADOS**

**JHONATTAN JAVIER CARREÑO MONTIEL
CHRISTIAN JOSE SCHOTBORGH CARABALLO**

**Trabajo de investigación presentado como requisito para optar por el título
de Ingeniero Químico**

**Director:
Dra. DEBORA NABARLATZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2014**

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos sinceros agradecimientos,

A la Universidad Industrial de Santander, por darnos el privilegio de formar parte de la familia universitaria.

A nuestra directora de proyecto, Dra. Debora Nabarlatz, su Fé en nosotros, su comprensión, su esmero y su dedicación dan frutos y nos permiten después de mucho esfuerzo este gran logro.

Al grupo de investigación CICTA, en especial al Ing. Said y al Químico Arley, ellos fueron un apoyo incondicional y siempre estuvieron presentes para facilitarnos los laboratorios y los equipos que necesitábamos usar.

Al grupo de investigación de INTERFASE, en especial al Ing. Sebastián y la Ing. Liliana, su amistad y su gracia siempre estuvo en todo momento, aun en aquellos momentos cuando pensábamos que nada saldría, ellos nos dieron palabras y energías para lograr culminar los experimentos.

A la docente Nathalia Bedoya, su paciencia, dedicación y las ganas de siempre ayudarnos a encontrar soluciones a los problemas fueron claves para todo este proyecto.

Dedicado a,

Dios primeramente, a ÉL sea por siempre la gloria y la honra. Seguro Estoy que sin Dios, nada de esto hubiera sido posible, Él es Mi REFUGIO.

A mi abuelo Pedro Montiel (QEDP), siempre estuvo conmigo, me apoyo, me brindo su amor y lo mejor de su vida, Te Amo y siempre estarás en mi corazón y en mi mente. Nunca podré olvidar sus sabias palabras: “Estudie mijo, que el estudio es la única herencia que sus papas le pueden dejar”.

A mi abuelita Matilde Forero (QEDP), tu sonrisa, tus besitos en el cachete y tu ternura siempre me mostraron que la edad no importa para expresar el amor que se puede sentir hacia una persona.

A mis padres, Javier Carreño y Nelsy Montiel, ellos son mi orgullo, mi apoyo, mi pilar, mi fuerza y mi modelo a seguir. Siempre creyeron en mí, me han dado lo mejor de ellos, me han dado todo el amor que un padre puede darle a su hijo y me han mostrado que el Amor de Padres es incondicional y nunca se agota.

A mi hermano Sebastián Carreño, eres mi orgullo y siempre estuviste conmigo, aun en mis tristezas.

A mi abuela Sofía Baena, deseo que Dios te siga teniendo con nosotros mucho más tiempo.

A mi Directora de Proyecto, la Dra. Debora Nabarlatz, siempre nos dio confianza, creyó en nosotros desde la primera vez que nos planteó el proyecto y nos acompañó en todo momento, aun mas en aquellos donde pensamos que nunca lo lograríamos.

A mi familia en general, y a mis amigos que siempre me apoyaron, que siempre me dieron una palabra de aliento y se preocuparon por mi futuro y mis estudios.

Jehová es mi pastor, Nada me Faltara.....

Jhonattan Carreño Montiel.

Dedicado a,

A Dios primeramente por siempre acompañarme en cada uno de los caminos de mi vida y ser mi fuerza.

A mi madre que sin ella nada de esto fuese posible, todo su esfuerzo, esmero, sacrificios, lágrimas, sudor y buenos valores que puso en mí finalmente dan frutos con éste proyecto.

A mis familiares que me han apoyado en este largo camino, dándome todo su cariño y gratitud.

A nuestra directora, la Dra. Debora Nabartalz, que gracias a sus enseñanzas y fe en nosotros, este sueño se hace realidad.

A mis compañeros, que estuvieron conmigo en las dificultades y en las alegrías.

Christian Schotborgh

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVOS GENERALES.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.3. MARCO TEÓRICO.....	20
1.3.1. ADSORCIÓN.....	20
1.3.2. CINÉTICA DE ADSORCIÓN.....	21
1.3.3. ISOTERMA DE ADSORCIÓN.....	22
1.3.4. PARÁMETROS QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN.....	23
1.3.5. CARBÓN ACTIVADO.....	24
1.3.6. CONTAMINANTE MODELO: CADMIO, COBRE, RODAMINA B Y FENOL.....	25
1.3.6.1 CADMIO.....	25
1.3.6.2. COBRE.....	25
1.3.6.3. RODAMINA B.....	26
1.3.6.4. FENOL.....	26
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	27
2.1. CARBONES ACTIVADOS.....	27
2.2. PRUEBAS PRELIMINARES PARA ADSORCIÓN DE METALES PESADOS.....	27
2.3. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE RODAMINA B Y FENOL.....	28
2.4. CINÉTICA DE ADSORCIÓN.....	28
2.4.1. RODAMINA B.....	28
2.4.2. FENOL.....	29
2.5. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	29

2.5.1. RODAMINA B.....	29
2.5.2. FENOL.....	30
2.6. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE RODAMINA B Y FENOL.....	30
2.6.1. RODAMINA B.....	30
2.6.2. FENOL.....	31
2.7. AJUSTE DE LOS MODELOS.....	31
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	32
3.2. ADSORCIÓN METALES PESADOS: CADMIO Y COBRE.....	32
3.3. CINÉTICA DE ADSORCIÓN.....	33
3.3.1. CINÉTICA DE ADSORCIÓN RODAMINA B.....	33
3.3.2. CINÉTICA DE ADSORCIÓN FENOL.....	36
3.4. ISOTERMA DE ADSORCIÓN.....	38
3.4.1. ISOTERMA DE ADSORCIÓN RODAMINA B.....	38
3.4.2. ISOTERMA DE ADSORCIÓN FENOL.....	40
3.5. COMPARACIÓN CON OTROS ADSORBENTES.....	42
4. CONCLUSIONES.....	44
BIBLIOGRAFÍA.....	45
ANEXOS.....	52

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tipos de isothermas de adsorción.....	22
Figura 2. Estructura química de la Rodamina B.....	26
Figura 3. Estructura molecular del Fenol.....	27
Figura 4. Resultados de los q_e para Cadmio y Cobre en la adsorción con CC y CL para los tiempos de 2 y 7 horas.....	33
Figura 5. Cinética de a) CC b) CL; para la adsorción de RhB. ($C_0=50$ ppm; agitación 500 rpm; pH=4,8 CC, pH=4,1 CL; $T=\pm 24^\circ\text{C}$).....	34
Figura 6. Cinética de a) CC b) CL, para la adsorción de fenol. ($C_0=50$ ppm; agitación 500 rpm; pH= 5,4 CC, pH=4,9 CL; $T=\pm 24^\circ\text{C}$).....	37
Figura 7. Isotherma para la adsorción de RhB a) CC (t=30 min) b) CL (t=60 min), (agitación 500 rpm; pH= 4,8 CC, pH=4,1 CL; $T=\pm 24^\circ\text{C}$).....	38
Figura 8. Isotherma de adsorción de fenol sobre a) CC b) CL. (Agitación 500 rpm; pH= 5,4 CC, pH=4,9 CL; $T=\pm 24^\circ\text{C}$; t=2 h).....	41

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Modelos de cinética de adsorción.....	21
Tabla 2. Modelos de isothermas de adsorción.....	23
Tabla 3. Características del carbón de llantas y del carbón comercial.....	32
Tabla 4. Condiciones para llevar a cabo la adsorción de Cd+2 (pH=4,25) y Cu+2 (pH=3,25), las mediciones de las concentraciones se realizaron por espectrofotometría de absorción atómica de llamas.....	32
Tabla. 5. Parámetros de los modelos de cinética y coeficiente de ajuste, para la adsorción de fenol y RhB en CC Y CL.....	34
Tabla 6. Parámetros de los modelos de isothermas de adsorción y coeficiente de ajuste, para la adsorción de fenol y RhB en CC y CL.....	39
Tabla 7. Comparación de la capacidad de adsorción de otros adsorbentes para la RhB y el fenol.....	43

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. DIAGRAMAS DE ESPECIACIÓN DE CADMIO Y COBRE.....	52
Anexo B. CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	53
Anexo C. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA RhB (CC).....	54
Anexo D. DATOS EXPERIMENTALE ISOTERMA RhB (CC).....	55
Anexo E. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA RhB (CL).....	56
Anexo F. DATOS EXPERIMENTALES ISOTERMA RhB (CL).....	57
Anexo G. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA FENOL (CC).....	58
Anexo H. DATOS EXPERIMENTALES ISOTERMA FENOL (CC).....	59
Anexo I. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA FENOL (CL).....	60
Anexo J. DATOS EXPERIMENTALES ISOTERMA FENOL (CL).....	61

RESUMEN

TÍTULO: Evaluación de carbón activado obtenido a partir de llantas usadas, para la adsorción en modo batch de Rodamina B, Fenol y metales pesados.

AUTORES: Jhonattan J. Carreño Montiel, Christian J. Schotborgh Caraballo.

PALABRAS CLAVES: Adsorción, carbón activado, rodamina B, fenol, metales pesados.

CONTENIDO: El presente trabajo muestra los resultados de la evaluación de dos tipos de carbones, un CC y un CL en modo batch a temperatura ambiente ($24\pm 1^\circ\text{C}$), para la adsorción de RhB, Fenol, Cadmio y Cobre. Las pruebas preliminares mostraron una baja capacidad de estos carbones para la adsorción de metales pesados, con lo que fueron descartados de las pruebas. Para las pruebas de RhB se obtuvieron cinéticas de pseudo 1^{er} orden para el CC y pseudo 2^{do} orden para el CL, los cuales alcanzaron el equilibrio en tiempos de 15 min y 60 min respectivamente. Las pruebas de isothermas arrojaron coeficientes de adsorción máximos para la RhB de $q_e=45,66$ mg RhB/g CC y $q_e=37,9$ mg RhB/g CL y se ajustaron a los modelos de Freundlich y de Redlich-Peterson. En cuanto a la adsorción de fenol, ambos carbones presentaron un ajuste al modelo cinético de pseudo 2^{do} orden, y un tiempo en alcanzar el equilibrio de 2 horas. La adsorción del fenol presentó ajustes de isothermas a los modelos de Redlich-Peterson para el CC y Langmuir para el CL. Sin embargo, se encontró una alta diferencia en los coeficientes de adsorción $q_e= 120,71$ mg fenol/g CC y $q_e= 14,32$ mg fenol/g CL, es decir el CC adsorbe 8 veces más fenol que el CL.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Dra. Debora A. Nabarlatz.

ABSTRACT

TITLE: Evaluation of activated carbon derived from used tires, for adsorption in batch mode Rhodamine B, phenol and heavy metals.

AUTHOR: Jhonattan J. Carreño Montiel, Christian J. Schotborgh Caraballo.

KEYWORDS: Adsorption, activated carbon, Rhodamine B, phenol, heavy metals.

DESCRIPTION: This study presents the results of the evaluation of two types of coals, a CC and CL in batch mode and at ambient temperature ($24\pm 1^\circ\text{C}$), for the adsorption of RhB, phenol, cadmium and copper. Preliminary tests showed a low capacity of these coals to adsorb heavy metals, thus were excluded from testing. For testing RhB were obtained pseudo 1st order kinetics for the CC and pseudo 2nd order for CL, which reached equilibrium at times of 15 min and 60 min respectively. Isothermal tests yielded coefficients for maximum adsorption of RhB of $q_e=45,66$ mg RhB/g CC y $q_e=37,9$ mg RhB/g CL, and models were fitted to Freundlich and Redlich-Peterson. As for the adsorption of phenol, both coals showed a kinetic model fit the pseudo 2nd order, and a time to reach equilibrium than 2 hours. The phenol adsorption isotherms presented settings the model to Redlich-Peterson and Langmuir CC for the CL. However, we found a high difference in the coefficients of adsorption $q_e=120,71$ mg fenol/g CC and $q_e=14,32$ mg fenol/g CL, is to say the CC phenol adsorbs 8 times more the CL.

* Degree Work. Research Mode.

** Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Dra. Debora A. Nabarlantz.

NOMENCLATURA

- i. (RhB) Rodamina B
- ii. (CC) Carbón comercial
- iii. (CL) Carbón llantas
- iv. (V) Volumen [mL]
- v. (T) Temperatura [°C]
- vi. (t) Tiempo de adsorción [min]
- vii. (q) Relación de adsorción [mg compuesto/g Carbón]
- viii. (%p/p) Porcentaje peso-peso [g/g]
- ix. (Ci) Concentración inicial (mg/L)
- x. (Cf) Concentración final (mg/L)
- xi. (Ce) Concentración en el equilibrio (mg/L)

INTRODUCCIÓN

Procesos industriales tales como plantas de galvanizado, minería de extracción de metales, producción de resinas, fertilizantes y la industria textil generan una amplia variedad de efluentes conteniendo iones metálicos (Cu, Cd, Cr, Pb, entre otros), colorantes industriales y en general contaminantes orgánicos e inorgánicos. Estas sustancias a altas concentraciones han demostrado ser peligrosas y constituyen una amenaza para el medio ambiente y la salud humana [1]. Las fuentes hídricas que son contaminadas con iones metálicos pueden tener graves consecuencias no sólo para el medio ambiente, sino también para las poblaciones humanas, ya que un exceso de este tipo de iones puede causar varias enfermedades y trastornos que pueden llegar a ser mortales [2,3]. Los compuestos hidroxí-aromáticos del tipo fenólicos, son considerados contaminantes prioritarios, ya que son perjudiciales para los organismos a bajas concentraciones y pueden ser tóxicos cuando se presentan en niveles elevados en los efluentes [4]. Igualmente, los colorantes industriales afectan la naturaleza del agua mediante la inhibición de la luz solar, reduciendo de este modo la acción fotosintética. Algunos colorantes son carcinógenos y mutágenos [5,6]. Las aguas contaminadas con este tipo de sustancias son tóxicas para todo tipo de organismos en la naturaleza, dado que generalmente son sustancias no biodegradables, y tienden a acumularse en la cadena trófica, lo que causa una serie de daños a órganos vitales, enfermedades terminales y trastornos a la salud humana.

En los últimos años se han propuesto diferentes métodos para la remoción y eliminación de compuestos metálicos, fenólicos y colorantes en soluciones acuosas tales como la biodegradación aeróbica o anaeróbica, oxidación por ozono, captación por resinas de intercambio iónico, filtración con membranas, ósmosis inversa, adsorción en carbón activado, entre otros, siendo este último uno de los más utilizados debido a su alta capacidad de remoción de compuestos con pesos moleculares relativamente bajos. En su mayor parte, estos métodos presentan bajos

rendimientos a la hora de remover compuestos (metales, colorantes y orgánicos) que se encuentran en bajas concentraciones en los efluentes [7, 8,9].

Entre ellos, la adsorción con carbón activado es de interés para muchos sectores económicos y áreas tan diversas como las industrias de alimentos, farmacéuticas, petroquímicas, así como para el tratamiento de agua potable, aguas residuales industriales y urbanas debido a su alta área interfacial y su estabilidad química [10]. Existen diversos tipos de materiales carbonosos que se pueden emplear para la obtención de carbón activado, entre ellos, carbón, cáscara de coco, madera, y desechos de polímero. Los neumáticos de desecho representan una alternativa interesante de materia prima, ya que a partir del caucho de llantas usadas, se pueden obtener tanto combustibles para la generación de energía, así como carbones de características mesoporosas y elevada área interfacial. En este sentido, el uso de los neumáticos desechados para preparar carbones activados, y combustibles, se considera una solución eficaz para mitigar la contaminación ambiental generada por estos desechos [11, 12,13].

Teniendo en cuenta el contexto anterior, en el presente trabajo se evalúa un carbón activado, obtenido a partir de llantas usadas mediante pirólisis, y activación química, para estimar su capacidad de adsorción con respecto a metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos, seleccionando el cadmio, el cobre, la rodamina B y el fenol como las sustancias modelo de cada una de las soluciones componentes para realizar las pruebas de adsorción en modo batch.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la capacidad de adsorción en modo batch de metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos presentes en las aguas industriales, de un carbón activado obtenido a partir de llantas usadas mediante pirólisis y activación química.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Determinar la cinética de adsorción de metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos a partir de llantas usadas.
2. Determinar las isotermas de adsorción de metales pesados, colorantes y compuestos orgánicos del carbón activado obtenido a partir de llantas usadas.
3. Comparar la capacidad de adsorción del carbón obtenido a partir de llantas con un carbón comercial.

1.3. MARCO TEÓRICO

1.3.1. ADSORCIÓN

La adsorción es la transferencia selectiva de uno o más solutos de una fase fluida (líquida o gaseosa), hacia una superficie de partículas sólidas, conocidas como adsorbentes [14].

Los adsorbentes pueden ser materiales del tipo sintético o naturales de estructura amorfa y microcristalina. Los más usados a gran escala incluyen el carbón activado, la alúmina activada, el gel de sílice, la tierra de fuller, arcillas, tamices moleculares, y otros [15]. El carbón activado puede ser representado como una matriz de carbono amorfo complejo e irregular con una capa de grafito que contiene varias impurezas tales como cenizas o átomos de oxígeno, nitrógeno, y azufre, y con varios grupos funcionales de superficie que consisten principalmente en enlaces C-O [16]. A temperaturas bajas, la adsorción es causada generalmente por las fuerzas de atracción intermoleculares en vez de por la formación de nuevos enlaces químicos y, en este caso, se conoce como adsorción física o fisisorción. A temperaturas más elevadas (por encima de 200°C) se dispone de la energía de activación necesaria para hacer o romper las uniones químicas y, si dicho mecanismo prevalece, la adsorción se conoce como quimisorción o adsorción activada [15].

1.3.2. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

La cinética de la adsorción hace referencia a la velocidad con que el adsorbato se adhiere al sólido hasta alcanzar el equilibrio, es decir, a la cantidad de moléculas o iones que se han adherido al sólido poroso a lo largo del tiempo hasta que no se presente una variación de la concentración en el efluente a tratar (equilibrio). En este sentido, es necesario determinar los factores que influyen en la cinética de adsorción. Para ello, se deben considerar cuatro etapas: el transporte del adsorbato acuoso hasta la película que rodea la superficie de la partícula del adsorbente (esta primera etapa puede ser omitida si el sistema está perfectamente agitado), difusión externa, difusión intra-particular y las reacciones superficiales físicas o químicas. Estas etapas se pueden comparar con una sucesión de resistencias a la transferencia de masa del adsorbato del medio de solución, hasta los sitios de adsorción del adsorbente [17].

Para la construcción de una gráfica representativa de la cinética de adsorción, ésta debe mostrar la cantidad de sustancia adsorbida por unidad de masa de adsorbente, en función del tiempo [18]. En cuanto a los modelos de ajustes que representan el comportamiento de la cinética de adsorción existen diversos modelos, que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Modelos de cinética de adsorción

Modelo cinético	Fórmula
Pseudo primer orden.	$\ln(q_e - q_t) = \ln(q_e) - (k_1) \cdot t$ <p> q_e = Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/g carbón). q_t = Capacidad de adsorción en el tiempo (mg/g carbón). k_1 = Constante Pseudo primer orden (min^{-1}). Consideración: La adsorción está dada por una relación directamente proporcional, al número de sitios activos libres del adsorbente y puede darse un proceso reversible [19]. </p>
Pseudo segundo orden.	$\frac{t}{q_t} = \left(\frac{1}{k_2 q_e^2} \right) + \left(\frac{t}{q_e} \right)$ <p> k_2 = Constante de Pseudo segundo orden ($\text{g} / (\text{mg} \cdot \text{min})$). q_e = Capacidad de adsorción en el equilibrio (mg/L). $k_2 q_e^2$ - Tasa de adsorción inicial ($\text{mg} / (\text{g} \cdot \text{min})$). Consideración: La adsorción está dada por la unión de un fuerte enlace covalente entre el adsorbato y el adsorbente [19]. </p>
Elovich.	$q_t = \left(\frac{1}{\beta} \right) \cdot \ln(\alpha\beta) + \left(\frac{1}{\beta} \right) \cdot \ln(t)$ <p> α = Tasa de quími-sorción ($\text{mg} / (\text{g} \cdot \text{min})$). β = Es el coeficiente que relaciona la extensión de la superficie cubierta y energía de activación de quími-sorción (g/mg) [17]. Consideración: supone que los sitios activos del adsorbente son heterogéneos, por tanto poseen energías de activación diferentes [20]. </p>

1.3.3. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

Las isothermas de adsorción proporcionan información sobre la capacidad del adsorbente para eliminar una unidad de masa de contaminante en las condiciones del sistema [21].

Según la representación gráfica de las isothermas (Figura 1), se puede evidenciar el comportamiento del sistema de adsorción. Una isoterma lineal indica que la cantidad adsorbida es proporcional a la concentración en el fluido. El comportamiento cóncavo hacia arriba de la isoterma, indica que son favorables, debido a que puede obtenerse una carga relativamente elevada del sólido para una baja concentración en el fluido. Una isoterma que es convexa hacia abajo recibe el nombre de desfavorable debido a que se obtienen cargas del sólido relativamente bajas y conducen a largas zonas de transferencia de materia en el lecho. El caso límite de una isoterma muy favorable es la adsorción irreversible, donde la cantidad adsorbida es independiente de la disminución de concentración hasta valores muy bajos [14].

Las isothermas juegan un papel importante en el diseño de un sistema de adsorción, ya que permiten encontrar una ecuación que representa la operación y relación entre adsorbente y adsorbato [22]. Los parámetros obtenidos a partir de los modelos proporcionan información sobre los mecanismos de adsorción y las afinidades entre el adsorbente y adsorbato [23].

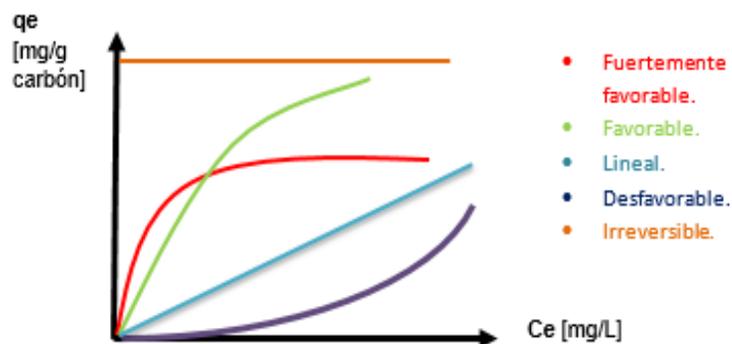


Figura 1. Tipos de isothermas de adsorción [14].

En la tabla 2, se muestran los modelos de isothermas empleados para el ajuste de los resultados experimentales.

Tabla 2. Modelos de isothermas de adsorción

Modelo	Ecuación	Parámetros	Descripción
Langmuir	$q_e = \frac{Q_m k_a C_e}{1 + k_a C_e}$	<p>*q_e es la masa de adsorbato retirado en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente (mg/g carbón).</p> <p>*C_e es la concentración en el equilibrio del adsorbato en solución (mg/L).</p> <p>*Q_m es la capacidad máxima de adsorción (mg/g carbón).</p> <p>*k_a es la constante de equilibrio de adsorción (Lmg^{-1}).</p>	<p>*Es válida para la adsorción de un soluto a partir de una solución líquida sobre una superficie que contiene un número finito de sitios idénticos [24].</p> <p>*Este modelo asume energías uniformes de adsorción sobre la superficie sin la transmigración del adsorbato en el plano de la superficie [24].</p> <p>*Este modelo es usado en sistemas homogéneos [25].</p>
Freundlich	$q_e = k_f C_e^{\frac{1}{n_f}}$	<p>*q_e es la masa de adsorbato retirado en el equilibrio por unidad de masa de adsorbente (mg/g).</p> <p>*k_f es la constante de Freundlich, la cual se puede definir como la adsorción o coeficiente de distribución y representa la cantidad de adsorbato retenido sobre el adsorbente para la unidad de concentración de equilibrio (Lg-1).</p> <p>*C_e es la concentración en el equilibrio del adsorbato en solución (mg/L).</p> <p>*n_f es una medida de la desviación de la linealidad de adsorción.</p>	<p>*La isoterma de Freundlich se deriva suponiendo una superficie heterogénea con una distribución no uniforme de calor de adsorción sobre la superficie [26].</p> <p>*La aplicación de la ecuación de Freundlich también sugiere que la energía de adsorción disminuye exponencialmente en la finalización de los centros de isothermas de adsorción de un adsorbente [24]</p>
Redlich Peterson	$q_e = \frac{K_{rp} C_e}{1 + \alpha C_e^\beta}$	<p>*K_{rp} es la constante de la ecuación de Redlich Peterson (L/g)</p> <p>*β, es un exponente que oscila entre 0-1.</p> <p>*C_e es la concentración final del adsorbato en la solución (mg/L)</p> <p>*α, la tasa de quimisorción (L/mmol).</p>	<p>*El modelo de R-P, incorpora las ventajas de los modelos de Langmuir y Freundlich, con la característica que pueden ser aplicados a sistemas homogéneos y heterogéneos.</p> <p>*Cuando β tiende a 1, el modelo se ajusta a Langmuir, si β tiende 0, el modelo se asemeja a Freundlich. [25]</p>

1.3.4. PARAMETROS QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN

- **pH:** Debido a las interacciones electrostáticas y no electrostáticas, que se espera que dominen a diferentes niveles de pH, se podrían afectar tanto las

características de la superficie del carbón activado, como la especiación de los metales [26].

- **Temperatura:** La capacidad de adsorción es casi independiente de la temperatura, pero depende significativamente de la concentración inicial [27].
- **Concentración inicial:** La concentración afecta directamente a la capacidad de adsorción, ya que si la concentración inicial del efluente es baja, se hace posible adsorber casi por completo el agente contaminante, debido a que los mesoporos del carbón activado se encuentran vacíos. Por el contrario si la concentración del efluente al inicio es alta, la capacidad de adsorción del carbón será baja, debido a la rápida saturación del carbón al inicio del proceso.
- **Tiempo:** Se hace necesario conocer el lapso de tiempo en que la adsorción alcanza el equilibrio, ya que de éste dependerá la cinética y el tiempo de operación del proceso, en el cual se alcanza la máxima capacidad de adsorción del carbón activado.
- **Relación soluto/adsorbente:** Dicta la cantidad de adsorbato que se ha adsorbido con respecto a la cantidad de carbón utilizado.

1.3.5. CARBÓN ACTIVADO

Los carbones activados se obtienen a partir de dos procesos básicos, la carbonización y la activación. El proceso de carbonización incluye el secado y calentamiento para eliminar subproductos indeseables. Los materiales carbonosos son entonces pirolizados y carbonizados en un rango de temperatura de 400 a 600°C en una atmósfera deficiente en oxígeno, lo cual elimina la fracción de bajo peso molecular volátil. Posteriormente, la activación se puede lograr térmicamente por el uso de gases de oxidación, tales como vapor de agua por encima de 800°C o dióxido de carbono a temperaturas más altas. La activación química, por otra parte, implica la impregnación de la materia prima con productos químicos tales como ácido fosfórico, hidróxido de potasio, y cloruro de cinc [28].

Los carbones activados están constituidos por una estructura porosa que determina su capacidad de adsorción. Posee una estructura química que influye en su interacción con los adsorbatos polares y no polares, presentando sitios activos, dislocaciones y discontinuidades que determinan sus reacciones químicas con otros átomos [10]. Sus propiedades de adsorción se deben a su alta área superficial, una estructura porosa, y un alto grado de superficie de adsorción. Por ello se utilizan para purificar, decolorar, desodorizar, eliminar el cloro o metales pesados, separar y concentrar compuestos con el objetivo de permitir la recuperación de las materias primas o productos, filtrar y eliminar o modificar los componentes nocivos de los gases y soluciones líquidas [10].

1.3.6. CONTAMINANTES MODELO: CADMIO, COBRE, RODAMINA B Y FENOL.

1.3.6.1. CADMIO

El cadmio es un metal que se utiliza principalmente como anticorrosivo y galvanizado en aceros. Es clasificado como un elemento tóxico prevalente con vida media biológica en un intervalo de 10-30 años. Algunos metales pesados como el cadmio constituyen un riesgo considerable para la salud por el contacto frecuente laboral y ambiental, y se sabe que puede dañar órganos vitales, tales como los riñones, el hígado y los pulmones, incluso en concentraciones muy bajas [29]. La exposición puede darse a través de líquidos, ya sea por las cañerías que contienen cadmio en sus soldaduras o por el agua que ha sido contaminada por las fábricas que tiran sus desechos al río, como la industria de la galvanoplastia [30].

1.3.6.2. COBRE

El cobre es uno de los metales más abundantes en el medio ambiente, debido a su importancia en los ciclos biogeoquímicos en suelos y sedimentos. Es un metal esencial para las plantas, el cual ayuda a metabolizar los hidratos de carbono y de nitrógeno. Varias fuentes de cobre, incluidos los desechos industriales y domésticos, las prácticas agrícolas, los drenajes de minas de cobre, y las pinturas anti-incrustantes, han contribuido a un aumento progresivo de las concentraciones

de cobre en el ambiente [31]. A diferencia de los contaminantes orgánicos, los metales como el cobre, no son biodegradables y su eliminación de diferentes fuentes de exposición son de vital importancia en términos de la salud de los seres vivos y del medio ambiente [32].

1.3.6.3. RODAMINA B

La RhB, de nombre sistemático (IUPAC) *Cloruro de [9-(2-carboxifenil)-6-dietilamino-3-xanteniliden]-dietilamonio* (ver figura 2), es un colorante catiónico típico que ha sido ampliamente utilizado como colorante en los productos textiles, productos alimenticios, ganadería, además de ser conocido marcador fluorescente en aguas [33]. La RhB es considerada un colorante carcinógeno y mutagénico [5,6]. Un contacto continuo por ingestión de este producto puede producir irritaciones e intoxicaciones nocivas para la salud humana.

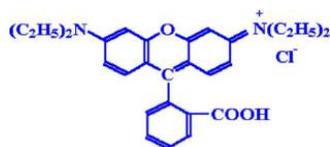


Figura 2. Estructura química de la Rodamina B [21].

1.3.6.4. FENOL

El fenol es un sólido blanco cristalino de fórmula química C_6H_5OH (ver figura 3), considerado altamente tóxico aún en bajas concentraciones, y que se encuentra presente en efluentes líquidos provenientes de fábricas de resinas fenólicas, fibras sintéticas, plaguicidas, colorantes, y aceites lubricantes, entre otros [34]. El fenol es uno de los contaminantes orgánicos más importantes al medio ambiente y a la salud humana, dado que es mutagénico y carcinogénico en concentraciones altas y puede ser absorbido por el cuerpo humano a través de la piel [4,7]. La ingestión de agua contaminada con fenol, tiene un gran riesgo para la salud humana y puede causar efectos negativos en el cerebro, el sistema digestivo, ojos, corazón, riñón, hígado, pulmón, nervios periféricos, la piel y en niños recién nacidos [35]

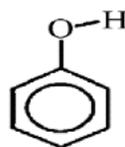


Figura 3. Estructura molecular del fenol [36].

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1. CARBONES ACTIVADOS

El carbón activado (CL) fue obtenido a partir de llantas usadas mediante pirólisis de llantas usadas a temperaturas entre 500 y 550 °C, con tiempos de reacción estimados en el rango de 100 a 140 minutos, seguida de activación química, usando H_3PO_4 como agente activante durante 40 minutos a 700°C y una relación de impregnación de 1,5 g AA/g precursor. El carbón comercial (CC) granulado usado para comparación fue obtenido en la empresa FILTRA H₂O LTDA (Bogotá, Colombia), igualmente al carbón comercial (CC), se le realizaron pruebas de análisis próximo y de área BET. El carbón activado comercial fue tamizado para utilizar la fracción de igual tamaño que el carbón de llantas.

2.2. PRUEBAS PRELIMINARES PARA ADSORCIÓN DE METALES PESADOS

Se realizaron unas pruebas preliminares para la adsorción de Cd^{+2} y Cu^{+2} (ver diagrama de especiación del cadmio y cobre en el anexo A). Para ello se preparó, una solución stock de 250 mL de cadmio a 50 ppm a partir de sulfato de cadmio hidratado ($3CdSO_4 \cdot 8H_2O$) al 99% de pureza (MERCK). Posteriormente se hicieron diluciones a 10 ppm y se tomaron 2 muestras de 25 mL, las cuales se dispusieron en erlenmeyers de 100 mL. A cada una se le agregó 0,1 g tanto de CC como de CL, agitando a 500 rpm en un agitador magnético. Al cabo de 2 horas y 7 horas respectivamente, se extrajeron 5 mL de cada muestra y se centrifugó en una microcentrífuga con el fin de separar el carbón de la solución remanente, para su posterior análisis.

De la misma forma, se preparó una solución stock de 250 mL de Cu^{+2} a 50 ppm a partir de sulfato de cobre II pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) al 99,1% de pureza (PANREAC QUIMICA). Posteriormente se hicieron diluciones a 10 ppm y se tomaron 2 muestras de 25 mL, las cuales se dispusieron en erlenmeyers de 100 mL. A cada una se les agregó 0,1 g tanto de CC como de CL, agitando a 500 rpm en un agitador magnético. Al cabo de 2 horas y 7 horas respectivamente, se extrajeron 5 mL de cada muestra y se centrifugó en una microcentrífuga con el fin de separar el carbón de la solución remanente, para su posterior análisis. El pH de la solución de cadmio se bajó a 4,25, mientras que el pH de la solución de cobre se bajó a 3,26 usando HCl 0,1 M. La cuantificación de Cd^{+2} y Cu^{+2} se realizó en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica de llama (Perkin Elmer Analyst 100).

2.3. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE RODAMINA B Y FENOL.

Se preparó una solución stock de Rodamina B (RhB) de 400 mg/L en un balón aforado de 500 mL a partir Rodamina B ($\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3$) con pureza del 100% p/p (R-A CHEMICALS) y agua destilada como solvente. Dicha solución fue empleada para la preparación de las respectivas diluciones para llevar a cabo los experimentos.

De la misma forma, para los experimentos realizados con Fenol se preparó una solución stock de 1000 mg/L, disolviendo fenol cristalizado ($\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$) de pureza 99% p/p (PANREAC) en 500 mL de agua destilada.

2.4. CINETICA DE ADSORCIÓN

2.4.1. RODAMINA B

En las pruebas de cinética, se utilizaron erlenmeyers de 100 mL c/u. En cada erlenmeyer, se adicionaron 25 mL de solución conteniendo 50 ppm de RhB y 0,05g de adsorbente (CL o CC) con un tamaño de partícula de 100 μm aproximadamente. Los erlenmeyers se sellaron con papel aluminio para evitar cualquier contaminación del medio exterior. La agitación fue constante a 500 rpm, y todos los experimentos se realizaron a temperatura ambiente (24 ± 1 °C). Luego de haber transcurrido el

tiempo elegido se retiró el erlenmeyer del agitador magnético, se extrajo parte de la solución de RhB mezclada con carbón activado (CL o CC), y posteriormente se llevó la muestra a una microcentrífuga. Se centrifugó a 14800 rpm durante 4 minutos con la finalidad de separar el carbón de la solución de RhB. Las soluciones ya separadas, fueron guardadas para su posterior análisis. Los experimentos se realizaron por duplicado para los tiempos: 3, 5, 7, 10, 15, 30, 45, 60 y 120 minutos, tanto para CL como CC.

2.4.2. FENOL

En los experimentos de cinética de fenol, se utilizaron erlenmeyers de 100 mL cada uno, con 25 mL de solución conteniendo 50 ppm de Fenol y 0,1 g de adsorbente (CL o CC). Los erlenmeyers se sellaron con papel aluminio, y se mantuvieron en agitación constante a 500 rpm. El proceso se llevó a cabo a temperatura ambiente (24 ± 1 °C) por duplicado.

Al haber transcurrido el tiempo elegido se retiró el erlenmeyer, se extrajo parte de la solución de fenol mezclada con carbón activado (CL o CC), y luego se llevó a microcentrífuga a 14800 rpm durante 4 minutos. Pasado el tiempo de centrifugación se extrajeron 6 mL y se depositaron en tubos de ensayo. Este procedimiento se realizó para los tiempos: 5, 7, 10, 20, 30, 60, 120, 180 y 240 minutos, tanto para CL como CC, por duplicado. Al término del tiempo de adsorción, las soluciones fueron guardadas para su posterior análisis.

2.5. ISOTERMA DE ADSORCIÓN

2.5.1. RODAMINA B

Para la determinación de la isoterma de adsorción de la rodamina B, se utilizaron erlenmeyers de 100 mL cada uno con 25 mL de las siguientes concentraciones iniciales de solución: 25, 50, 100, 150, 200, 300, 350 y 400 ppm de RhB. La relación de los carbones fue la misma para cada muestra, 0,05 g de carbón/25 mL de solución. La velocidad de agitación fue de 500 rpm. Todas las pruebas se realizaron

por duplicado a temperatura ambiente (24 ± 1 °C). Debido a la cinética del proceso, se dejó pasar un tiempo de 60 minutos para alcanzar el equilibrio cuando se trabajó con CL, mientras que para CC el tiempo fue de 30 minutos. Transcurrido el tiempo de adsorción, se procede a extraer la solución de RhB siguiendo el mismo procedimiento utilizado en la cinética. Una vez extraídas las muestras, estas se depositaron en tubos de ensayo para ser llevados a su posterior análisis.

2.5.2. FENOL

Para la determinación de la isoterma de adsorción del fenol, se utilizaron erlenmeyers de 100 mL cada uno con 25 mL de las siguientes concentraciones iniciales: 30, 50, 70, 100, 200, 300 y 400 ppm de fenol en las pruebas con CL. Para las pruebas con CC, se emplearon concentraciones iniciales: 30, 50, 70, 100, 200, 300, 400, 600, 800 y 1000 ppm de fenol. En todos los casos la masa de carbón fue la misma para cada muestra (0,1 g/25 mL de solución). Los erlenmeyers fueron sellados con papel aluminio. La velocidad de agitación fue de 500 rpm. Todas las pruebas se realizaron por duplicado a temperatura ambiente (24 ± 1 °C). Tanto para CL como CC, se dejó pasar un tiempo de 120 minutos antes de retirar cada uno de los erlenmeyers del agitador magnético. Transcurrido el tiempo de adsorción, se procede a extraer la solución de fenol siguiendo el mismo procedimiento utilizado en la cinética. Una vez extraídas las muestras, estas se depositaron en tubos de ensayo cada uno para ser llevados a su posterior análisis.

2.6. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE RODAMINA B Y FENOL

2.6.1. RODAMINA B

Para determinar la concentración de RhB en solución, se utilizó un espectrofotómetro Génesis 20 marca THERMO SPECTRONIC 4001/4 y una cubeta de cuarzo. La longitud de onda máxima para la RhB fue de 553 nm. Para el calibrado (Anexo B), se prepararon 7 patrones de RhB conteniendo 0,5; 1; 1,5; 2; 3, 4 y 5 ppm a partir de una solución stock de 400 ppm. Las muestras fueron diluidas

convenientemente. Luego de cada medición, la cubeta de cuarzo fue purgada con agua destilada y etanol para evitar que el colorante se pegara en la cubeta.

2.6.2. FENOL

Para determinar la concentración de fenol en solución, se utilizó un espectrofotómetro Génesis 10S UV-VIS THERMO SCIENTIFIC y una cubeta de cuarzo, a una longitud de onda de 273 nm. Partiendo de una solución stock de 50 ppm, se prepararon 7 soluciones patrón de fenol 1; 5; 10; 20; 30, 50 y 70 ppm las cuales fueron utilizadas para el calibrado (Anexo B). Las muestras fueron diluidas convenientemente.

2.7. AJUSTE DE LOS MODELOS

Los modelos de cinética y de isoterma de adsorción fueron programados en Excel y sus parámetros fueron obtenidos mediante una regresión no lineal a partir de la herramienta Solver de Excel, minimizando el coeficiente de variación (CV) de la muestra, el cual se presenta a continuación [37]:

$$CV = \frac{S}{\bar{Y}}$$

Donde S es la desviación estándar del conjunto de datos del modelo con respecto a los datos experimentales para la capacidad de adsorción, y \bar{Y} representa el promedio aritmético de los datos experimentales para la capacidad de adsorción.

Para cuantificar la desviación o el ajuste de estos modelos con respecto a los datos experimentales se utilizó el coeficiente R^2 [37]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

Donde \hat{Y}_i representa la capacidad de adsorción predicha por el modelo, Y_i el valor experimental de la capacidad de adsorción, y \bar{Y} representa el promedio de la capacidad de adsorción de los valores experimentales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En la tabla 3, se pueden encontrar las características más importantes tanto del carbón de llantas (CL) como del carbón comercial (CC).

Tabla 3. Características del carbón de llantas y del carbón comercial.

	Carbón de llantas (CL)	Carbón comercial (CC)
Área Superficial (m ² /g)	53,2	864,36
Volumen de micro poro(m ³ /g)	0,0843	0,0043
Volumen de meso poro(m ³ /g)	0,6466	1,849
Activación	H ₃ PO ₄	Vapor de alta temperatura
(%p/p) Cenizas	8,02	15
(%p/p) Carbón fijo	78,38	84,15

3.2. ADSORCIÓN DE METALES PESADOS: CADMIO Y COBRE

Se realizaron experimentos preliminares con cadmio y cobre para evaluar la capacidad de adsorción de estos compuestos. Los resultados obtenidos pueden observarse en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones para llevar a cabo la adsorción de Cd⁺² (pH=4,25) y Cu⁺² (pH=3,25).

	Ci (ppm)	V (mL)	Peso CC (g)	Peso CL (g)	Tiempo (horas)	T (°C)	Velocidad Agitación (rpm)	Cf (ppm) CC	Cf (ppm) CL	q _e (mg/g CC)	q _e (mg/g CL)
Cadmio	10	25	0,1003	0,1005	2	24 (±1)	500	6,83	9,17	0,790	0,206
			0,1005	0,1002	7			6,68	9,05	0,826	0,237
0,1004			0,1	2	8,851			8,16	0,286	0,460	
0,1001			0,1004	7	6,167			7,87	0,957	0,530	
Cobre											

En la figura 4, se observa el q_e obtenido para el Cadmio y el Cobre para los tiempos de 2 y 7 horas respectivamente. La baja capacidad de adsorción de los carbones (CC y CL) puede deberse al aumento de iones hidronio (H₃O⁺) debido a los bajos

pH. Los iones hidronio tienden a competir con los iones metálicos por los sitios activos de los carbones activados disminuyendo la adsorción de los metales. El CL al tener un área BET tan baja, se satura muy rápido y no permite continuar la adsorción de los iones metálicos [54]. Las mediciones de las concentraciones se realizaron por espectrofotometría de absorción atómica de llamas.

De esta manera se concluye que el CL no es afín a los metales pesados de una forma tan eficiente en comparación con CC, y se decide desistir de los respectivos análisis de adsorción para los iones metálicos.

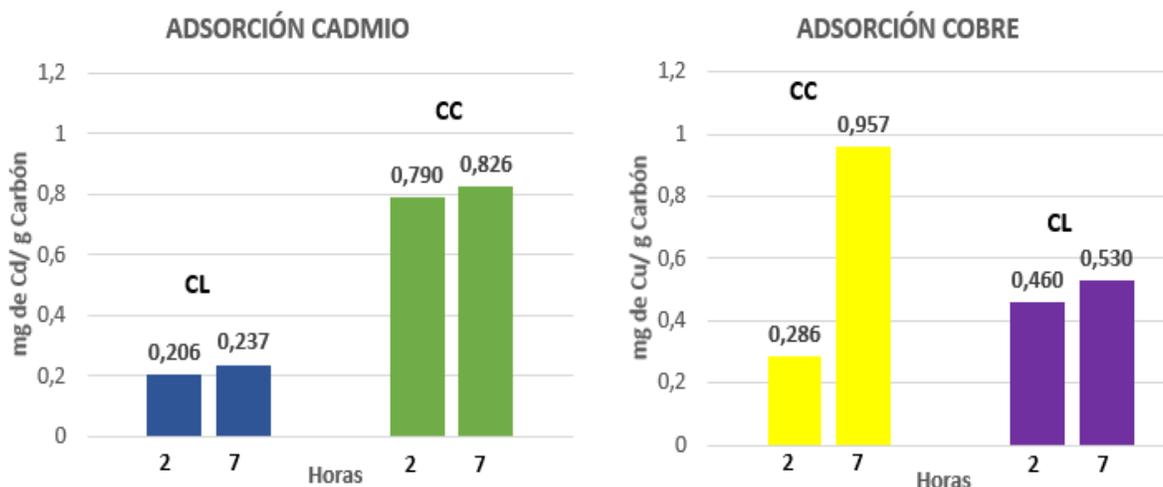


Figura 4. Resultados de los q_e para Cadmio y Cobre en la adsorción con CC y CL para los tiempos de 2 y 7 horas.

3.3. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

3.3.1. CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE RODAMINA B

La cinética dicta la velocidad con que el adsorbato es adherido a la superficie del carbón y el tiempo en el cual dicha adsorción alcanza el equilibrio. Los resultados de las pruebas de cinética de adsorción de Rodamina B se presentan en la Figura 5a para el CC y la Figura 5b para CL. Como puede observarse, el equilibrio se alcanza a los 15 minutos para el CC, mientras que para el CL fue de 60 minutos.

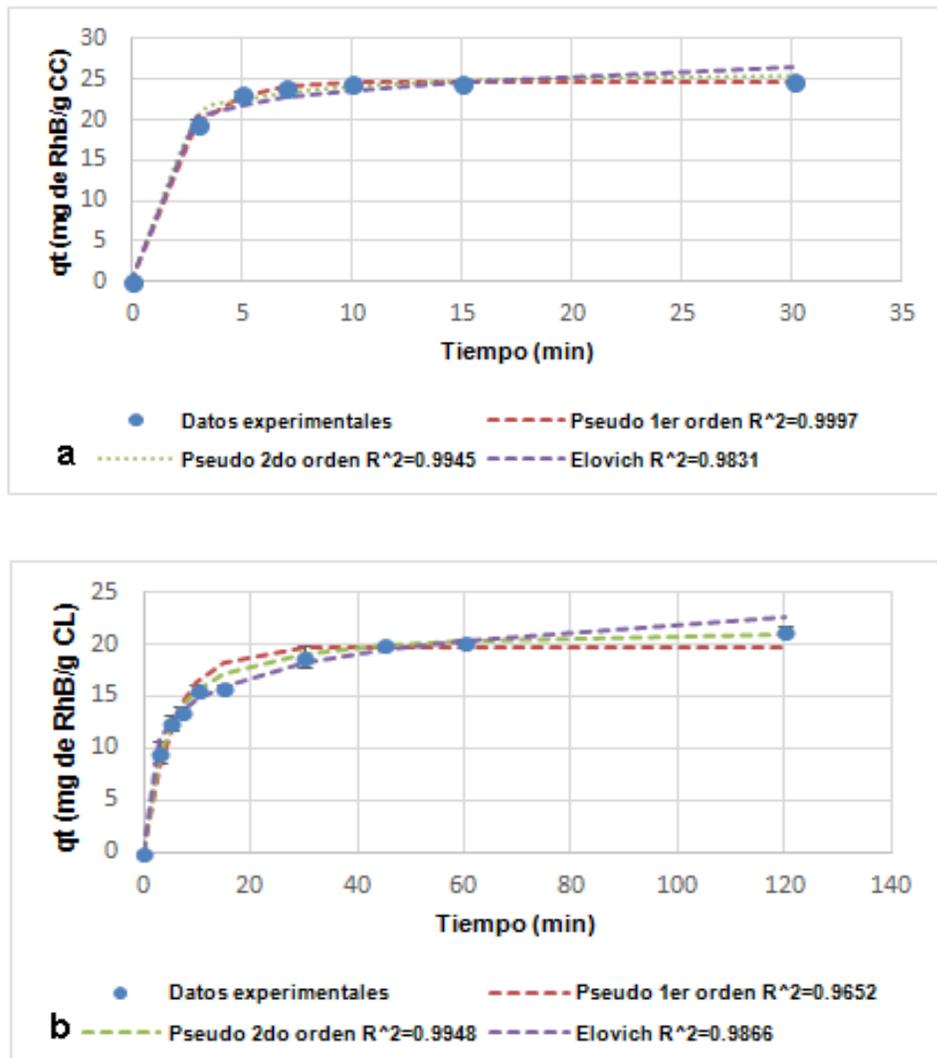


Figura 5. Cinética de a) CC b) CL; para la adsorción de RhB. ($C_0=50$ ppm; agitación 500 rpm; pH= 4,8 CC, pH=4,1 CL; $T=\pm 24^\circ\text{C}$).

En la figura también se aprecian los diferentes modelos de ajuste de cinética, a los cuales se les calcularon los parámetros característicos de cada modelo y se cuantificó su proximidad con los datos experimentales por medio del uso del coeficiente de ajuste R^2 . Los valores paramétricos y el coeficiente de ajuste se presentan en la tabla 5:

Tabla. 5. Parámetros de los modelos de cinética y coeficiente de ajuste, para la adsorción de fenol y RhB en carbón activado comercial y carbón activado obtenido a partir de llantas.

PARAMETROS DE LA CINETICA										
Adsorbente	Adsorbato	Pseudo primer orden			Pseudo segundo orden			Modelo de Elovich		
		K1(min-1)	qe(mg/g)	R ²	k2(g/mg.min)	qe(mg/g)	R ²	α(mg/ g. min)	β(g/mg)	R ²
Carbón comercial	RhB	0,5230	24,7279	0,9997	0,0440	26,2562	0,9945	2474,3275	0,388245	0,9831
	Fenol	0,4760	11,8660	0,9959	0,1525	12,0680	0,9996	902,6742	0,9035	0,8996
Carbón de llantas	RhB	0,1769	19,6965	0,9652	0,0117	21,5773	0,9948	31,7205	0,3142	0,9866
	Fenol	0,2657	2,7867	0,9915	0,2172	2,8727	0,9910	41,3551	3,2485	0,8999

Como se aprecia en la figura 5, la velocidad de adsorción de RhB en CC es mucho mayor que en CL. En este sentido, el tiempo en que los carbones alcanzan el equilibrio de adsorción, es aproximadamente 4 veces más rápido en CC que en CL.

En la tabla 5 se logra apreciar que para la adsorción de la RhB sobre el CC el modelo que más se ajustó a los datos experimentales fue el modelo de Pseudo primer orden ($R^2=0,9997$). Este modelo predice que la adsorción se debe a que las moléculas de adsorbato ocupan un sitio libre dentro de los poros del carbón [18]. Este tipo de adsorción es considerada reversible, ya que estima que no hay una atracción química entre el adsorbente y el adsorbato, y la cinética considera sólo el tiempo de transporte desde la película líquida de la solución hasta los sitios libres del carbón.

Sin embargo, el modelo de pseudo segundo orden presentó un ajuste de $R^2=0,9945$ para el CC en presencia de solución de RhB. Dado que éste ajuste es muy cercano al modelo de pseudo primer orden, no se puede descartar la presencia de interacciones de enlaces covalentes entre la RhB y el CC. Esto está en consonancia con el parámetro q_e experimental, el cual es de 24,81 mg RhB/g CC, lo que coincide con el valor de q_e obtenido para el modelo de pseudo primer orden (24,73 mg RhB/g CC), mientras que el obtenido para el modelo de pseudo segundo orden fue de 26,26 mg de RhB/g CC.

Por otro lado, el modelo cinético que más se ajustó para la adsorción de Rodamina B sobre CL fue el modelo de pseudo segundo orden ($R^2=0,9948$). El modelo de pseudo segundo orden describe que las interacciones adsorbente-adsorbato son

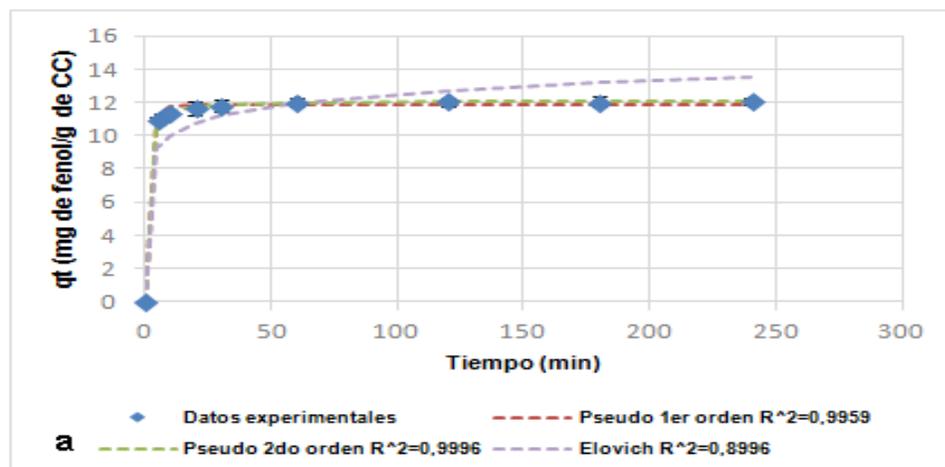
producto de la unión por medio de enlaces covalentes [18]. El ajuste a este modelo identifica que la cinética depende tanto de la etapa de transporte de la RhB hasta el sitio activo, como la transferencia de electrones entre el adsorbente y el adsorbato [27].

Al comparar los parámetros que se obtuvieron del modelo con los datos experimentales, se observa que para el dato experimental q_e 21,33 mg RhB/g CL coincide con el parámetro del modelo q_e el cual presenta un valor de 21,58 mg RhB/g CL, revelando que el modelo de pseudo segundo orden es el que mejor representa la cinética del CL.

Finalmente, para la misma concentración inicial de Rodamina B, la capacidad de adsorción en el equilibrio para ambos carbones fue cercana con un $q_t=24,81$ mg de RhB/g de CC y $q_t= 21,33$ mg RhB/g de CL. Esto quiere decir que la diferencia en la velocidad de adsorción puede ser debida a las diferencias en la afinidad química entre la superficie de los carbones y la RhB, o por la diferencia de áreas superficiales de estos dos carbones (tabla 3).

3.3.2. CINÉTICA DE ADSORCIÓN FENOL

Los resultados obtenidos para la cinética de adsorción de fenol sobre ambos carbones evaluados en la figura 6.



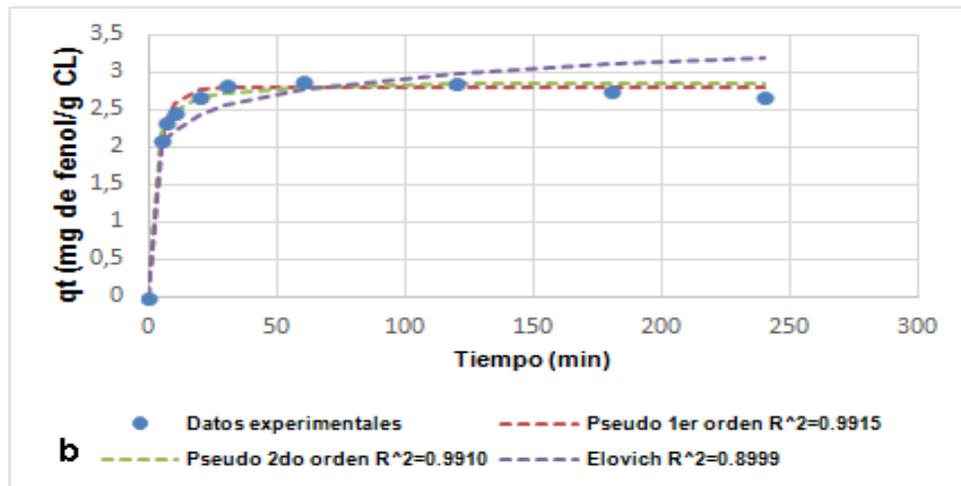


Figura 6. Cinética de la adsorción del fenol a) CC b) CL ($C_0=50$ ppm; agitación 500 rpm; pH= 5,4 CC, pH=4,9 CL; $T=\pm 24^\circ\text{C}$).

Como puede observarse, el equilibrio de adsorción para ambos carbones se alcanza al mismo tiempo (100 min), pero se observa una diferencia significativa en la capacidad de adsorción del CC (q_e cercano a 12 mg Fenol/g CC), mientras que el CL presenta una capacidad 4,5 veces menor (q_e cercano a 3 mg Fenol/g CL).

Los parámetros de los modelos se presentaron en la anterior tabla 5. El ajuste del modelo cinético que presentó mayor relevancia para el CC fue el modelo de pseudo segundo orden con coeficiente de ajuste $R^2=0,9996$. El parámetro del modelo referido ($q_e= 12,07$ mg fenol/g CC), es similar al obtenido experimentalmente ($q_e= 12,10$ mg fenol/g CC), lo que corrobora dicha tendencia.

En cuanto a la cinética de adsorción de fenol sobre CL, el modelo de pseudo primer orden fue el que mejor se ajustó con un $R^2=0,9915$, aunque el modelo de pseudo segundo orden también tiene una alta factibilidad para representar la cinética del CL pues su ajuste R^2 fue de 0,9910. Debido a la diferencia casi insignificante entre los dos ajustes, se puede llegar a concluir que para el CL las interacciones adsorbente-adsorbato están ligadas tanto a la fase de transporte de la película del líquido a la superficie del carbón [38], como al enlazamiento por reacción entre la superficie activa del carbón y el fenol. Cuando se analizan los parámetros de q_e obtenidos

(2,7867 y 2,8727 mg fenol/g CL para el modelo de pseudo primer orden y pseudo segundo orden respectivamente), y se lo compara con el valor experimental de q_e en el equilibrio (2,70 mg fenol/g CL), se corrobora que el modelo más ajustado a la tendencia experimental es el de pseudo primer orden.

3.4. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

3.4.1. ISOTERMA DE ADSORCIÓN DE RODAMINA B

La isoterma de adsorción muestra la distribución del adsorbato entre la fase líquida y la fase sólida en estado de equilibrio. Los resultados obtenidos para las isotermas de adsorción de rodamina B sobre CC y CL se presentan en la figura 7.

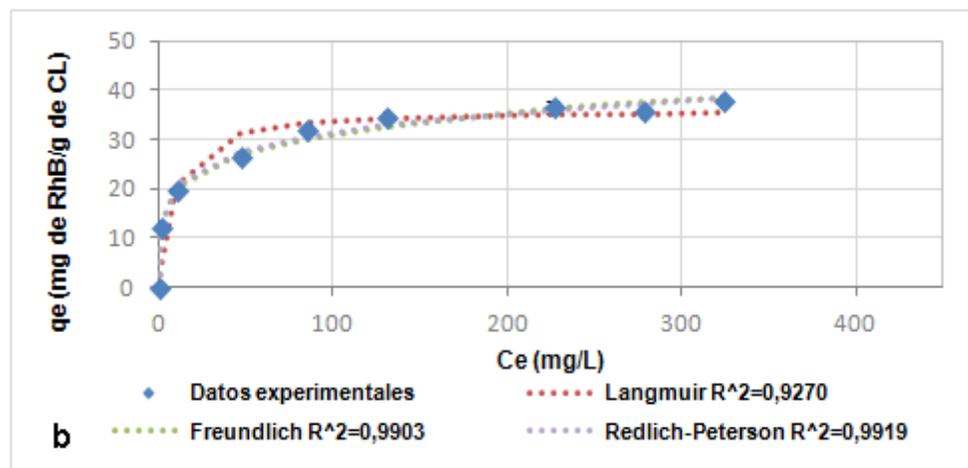
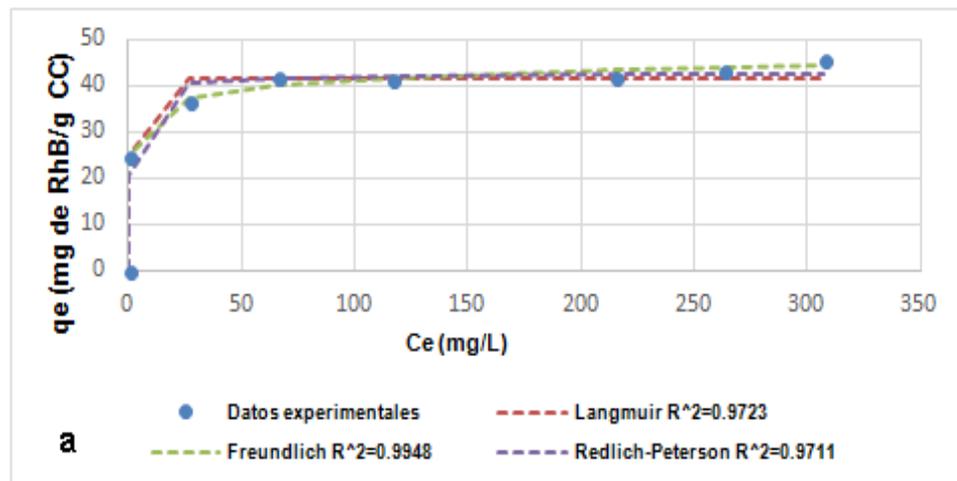


Figura 7. Isoterma para la adsorción de RhB a) CC (t=30 min) b) CL (t=60 min), (agitación 500 rpm; pH= 4,8 CC, pH=4,1 CL; T=±24°C).

Al analizar las gráficas 7a y 7b se aprecia una pendiente lineal (isoterma ideal) para el CC, hasta alcanzar un q_e de aproximadamente 40 mg RhB/g CC. Para el CL sin embargo es de tipo cóncava, representando una isoterma de tipo favorable. Comparando estos resultados se afirma que ambos carbones presentan gran afinidad por la RhB, ya que a bajas concentraciones de RhB el carbón no alcanza la saturación. En general, el CC presenta mayor capacidad de adsorción que el CL, pero a altas concentraciones ambos carbones presentan prácticamente la misma capacidad de adsorción.

Los parámetros de adsorción para las isotermas se calcularon mediante el uso de la herramienta solver de Excel y se determinó el ajuste de los modelos de isotermas, aplicando el coeficiente de ajuste R^2 . Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Parámetros de los modelos de isotermas de adsorción y coeficiente de ajuste, para la adsorción de fenol y RhB en CC y CL.

PARAMETROS DE LAS ISOTERMAS											
Adsorbente	Adsorbato	Langmuir			Freundlich			Redlich-Peterson			
		Ka(Lmg ⁻¹)	Qm(mg/g)	R ²	kf(Lg ⁻¹)	nf	R ²	β	α (L/mmol)	krp(L/g)	R ²
Carbón comercial	RhB	24,6496	41,7729	0,9723	29,9941	14,6223	0,9948	0,9810	20,5214	786,414	0,9711
	Fenol	0,0416	119,9792	0,9634	22,2802	3,5479	0,9817	0,7925	0,7606	26,1873	0,9936
Carbón de llantas	RhB	0,1340	36,1764	0,9270	13,1944	5,3723	0,9903	0,8317	5,2392	76,0782	0,9919
	Fenol	0,0057	23,9677	0,9459	0,5185	1,6876	0,9016	1,0000	0,0057	0,1358	0,9459

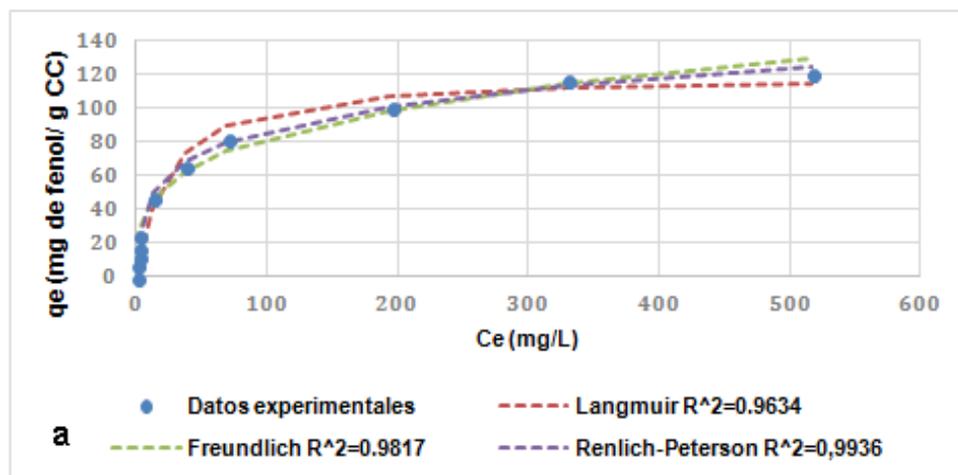
En la figura 7 se aprecian los diferentes modelos de isotermas de adsorción evaluados (Freundlich, Langmuir y Redlich-Peterson), y se muestra el ajuste de estos modelos con los datos experimentales. Haciendo uso del coeficiente de ajuste, el modelo que mejor representa la forma de la isoterma para el CC es el modelo de Freundlich, con un ajuste de $R^2=0,994$. El modelo describe la formación

de multicapas adheridas a la superficie del carbón y muestra la presencia de un sistema heterogéneo, cuyas energías no son iguales en cada sitio de adsorción [39]. El valor del coeficiente n_f es una medida de la linealidad de la adsorción: para altos valores de n_f indica que la adsorción presenta cierto grado de homogeneidad, mientras que para valores pequeños representa un alto grado de heterogeneidad, es decir existe la presencia de multicapas dentro del sitio de adsorción [40].

Para el CL el modelo que mejor ajusta los datos experimentales fue el de Redlich-Peterson ($R^2=0,9919$). Este modelo presenta un valor de coeficiente $\beta=0,8317$ lo que indica que las energías en el sistema no son iguales en toda la superficie del carbón, o existe la presencia de múltiples capas alrededor de la superficie del mismo [39]. Al comparar los máximos coeficientes de adsorción en el equilibrio para el CC y CL se evidencia que ambos carbones poseen una alta capacidad de adsorción para la RhB ($q_{e\text{ CC}}=45,67$ y $q_{e\text{ CL}}=37,90$ mg RhB/g carbón), siendo la diferencia entre las capacidades de adsorción para el CC aproximadamente un 17% por encima del CL.

3.4.2. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN DE FENOL

Los resultados para las pruebas de adsorción de fenol sobre carbón comercial como en carbón de llantas se muestran en la figura 8.



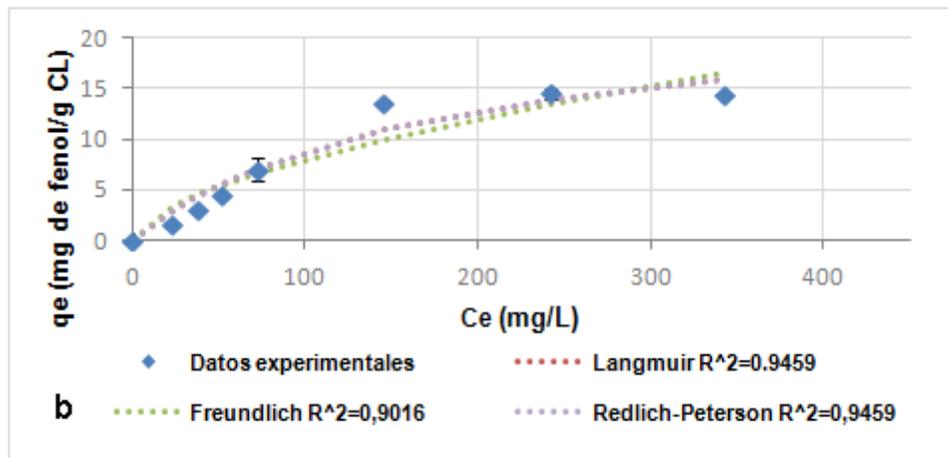


Figura 8. Isotherma de adsorción de fenol sobre a) CC b) CL. (Agitación 500 rpm; pH= 5,4 CC, pH=4,9 CL; $T=\pm 24^{\circ}\text{C}$; $t=2$ h).

Los datos experimentales revelan una diferencia de adsorción bastante alta entre los dos carbones, mostrando que el CC superó en un 87% al CL. La figura 8 muestra los diferentes modelos que ajustan la isoterma. El modelo de Redlich-Peterson tuvo el mejor ajuste para la isoterma del CC ($R^2=0,9936$); mientras que el modelo de Langmuir ajustó mejor los datos para CL. ($R^2=0,9459$).

Al analizar los parámetros de ajustes para el CC se encontró que el valor de $\beta=0,7925$, lo que sugiere que existe cierta interacción química que predomina en la adsorción del fenol y los sitios activos del carbón (modelo de Redlich- Peterson). Puesto que el valor de β no es 1, se puede deducir que existe presencia de formación de multicapas dentro de los poros del carbón lo que origina la desviación de este parámetro, además de sugerir que no todos los sitios de adsorción poseen la misma energía, mostrando cierto grado de heterogeneidad.

Por otro lado, el CL presentó gran afinidad hacia el modelo de Langmuir, lo cual sugiere que el factor predominante dentro de la adsorción son las interacciones químicas [40]. Al analizar el modelo de Redlich-Peterson se observa que posee un ajuste igual al modelo de Langmuir, siendo su coeficiente β exactamente 1, con lo que el modelo de Redlich-Peterson literalmente se convirtió en el modelo de Langmuir explicando así la igualdad presentada en el ajuste. Por otro lado el

parámetro k_a , que indica la quimisorción mostró un valor de 0,0057 L/mg. Dado que este coeficiente es inversamente proporcional al coeficiente de adsorción, esto representa que para un valor bajo se obtenga alta probabilidad que la adsorción es debido a enlazamientos químicos.

Finalmente, se destaca que el CC fue muy superior en la adsorción del fenol a comparación con el CL, lo cual se evidencia claramente en los valores máximos de la capacidad de adsorción (q_e) a la máxima concentración de 400 ppm (Figura 8). En este caso, el CC presentó un $q_e = 124,66$ mg fenol/g CC y el CL $q_e = 23,97$ mg fenol/g CL. La capacidad de adsorción de CC es aproximadamente 8 veces mayor con respecto a CL.

3.5. COMPARACIÓN CON OTROS ADSORBENTES

La tabla 7, muestra en orden decreciente la capacidad de adsorción de adsorbentes encontrados en la literatura. En la literatura se reporta que para la adsorción de RhB, uno de los carbones que presentan mejores características de adsorción son los carbones pirolíticos obtenidos a partir de llantas usadas, siendo que la literatura reporta un valor del coeficiente de adsorción $q_e = 307,2$ mg/g de carbón [27]. En este sentido, el carbón obtenido a partir de llantas usadas en este proyecto obtiene su valor máximo de $q_e = 37,9$ mg RhB/g carbón. Cabe aclarar que el carbón que reporta el artículo posee un área BET = 720 m²/g [27], mientras que el carbón pirolítico evaluado en este estudio presenta un área BET = 325 m²/g. Estas diferencias en el área superficial provienen del hecho de que el carbón evaluado en el artículo [27] fue obtenido por activación física (fue sometido a activación en una atmósfera de N₂ a una temperatura promedio de 800°C durante 3 horas, favoreciendo el incremento del área BET y el aumento de mesoporos del carbón), mientras que el CL fue obtenido en este estudio mediante pirólisis intermedia + activación química con H₃PO₄. Dado que la pirólisis elimina la mayor fracción volátil, generando un residuo líquido con posible aprovechamiento energético, esto explica la baja área superficial

que posee el sólido remanente y el bajo rendimiento acorde a los carbones que reporta la literatura.

Tabla 7. Comparación de la capacidad de adsorción de otros adsorbentes para la adsorción de RhB y fenol.

Adsorbente	Adsorbato	q _{max} (mg/g)	fuelle
Rice husk-based porous carbons (RHCs)	RhB	383,40	[48]
carbón de llantas	RhB	307,20	[7]
BPH activated carbon	RhB	263,90	[42]
Bagazo de agricultura	RhB	263,85	[43]
Polvo de palo de yute	RhB	91,10	[44]
Carbón de comercial (FILTRA H2O)	RhB	45,67	Este estudio
Sodium montmorillonite	RhB	42,20	[45]
Carbón de llantas	RhB	37,90	Este estudio
Residuo de palma de Sago	RhB	16,10	[22]
Surfactant-modified coconut coir pitch	RhB	14,90	[46]
Cob AC (KOH/char)	Fenol	326,56	[47]
Cascara de huevo	Fenol	192,00	[49]
Poliacrilonitrilo (PAN)	Fenol	167,00	[50]
Bagasses AC (85.8%)	Fenol	127,99	[51]
Carbón de comercial (FILTRA H2O)	Fenol	120,71	Este estudio
Rice husk AC (50 °C)	Fenol	20,89	[52]
Carbón de llantas	Fenol	14,33	Este estudio
CAC	Fenol	7,06	[53]
BDTDAzeolite	Fenol	0,38	[54]
HDTMAzeolite	Fenol	0,38	[54]

En cuanto al fenol, el CL presenta muy poca capacidad de adsorción y se ubica entre los últimos lugares de los carbones reportados en la literatura con un $q_e = 14,4$ mg/g, siendo sólo superior a los adsorbentes hechos a base de minerales. Si se lo compara con los principales adsorbentes reportados en la literatura, el carbón obtenido a partir de maíz presenta un $q_e = 326,56$ mg/g carbón, teniendo una capacidad 2,7 veces mayor que la del CC ($q_e = 120,7$ mg/g CC) y 22,7 veces mayor que el CL.

4. CONCLUSIONES

El carbón pirolítico preparado a partir de llantas, funciona como adsorbente de colorantes como la rodamina B, y de compuestos orgánicos como el fenol. En cuanto a la adsorción de metales pesados, las pruebas preliminares mostraron que la adsorción era muy poco favorable en este caso. Al comparar el carbón de llantas con el carbón comercial, es notorio que la mayor capacidad de adsorción la tiene el carbón comercial para los 4 componentes estudiados. Estas diferencias pueden atribuirse a las diferencias en el área BET obtenida para cada carbón, así como la existencia de diferentes grupos funcionales en la superficie de cada carbón, los cuales varían en función de la materia prima y las condiciones del proceso.

Para la adsorción de rodamina B con carbón de llantas, el modelo de pseudo-segundo orden presentó el mejor ajuste en la cinética, mostrando que la quimisorción limita el proceso. El carbón comercial, tuvo un mejor ajuste al modelo de pseudo-primer orden, es decir, que el proceso se lleva a cabo por fisisorción. Para el ajuste de los modelos de isotermas, Redlich-Peterson presentó el mejor ajustes para el carbón de llantas, mientras que para el comercial fue el de Freundlich.

Por otro lado, para la adsorción de fenol con CL, el modelo cinético que mejor se ajustó fue el de pseudo-primer orden, indicando que las interacciones adsorbente-adsorbato son netamente físicas. Para las isotermas, el CL tuvo mayor ajuste al modelo de Langmuir, mientras que el CC, mostró un óptimo ajuste por el modelo de Redlich-Peterson. La capacidad de adsorción máxima fue de 120,71 Y 14,33 para CC y CL respectivamente, valores menores a los reportados por la literatura para este tipo de contaminante.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AHLUWALIA, S.S., GOYAL, D. (2007). Microbial and plant derived biomass for removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology*, 98 (2243-2257).
- [2] QUIONG WU., JIE CHEN., MALCOLM CLARK & YAN YU. (2014). Adsorption of copper to different biogenic oyster Shell structures. *Applied Surface Science. Physicochemical and Engineering Aspects* 311 (264-272).
- [3] IGBERASE, E., OSIFO, P., & OFOMAJA, A. (2014). The adsorption of copper (II) ions by polyaniline graft chitosan beads from aqueous solution: Equilibrium, kinetic and desorption studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2 (362-369).
- [4] LU, GUOCHENG., HAO JIAO., MA HONGWEN., FANG QINFANG., WU LIMEI., WEI MINGQUAN & ZHANG YIHE. (2011). The adsorption of phenol by lignite activated carbon. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 19(3) (380-385).
- [5] MCKAY, G. (1982). Adsorption of dye stuffs from aqueous solutions with activated carbon. I. Equilibrium and batch contact – time studies. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 32 (759–772).
- [6] MCKAY, G., OTTERBURN, M.S & JAMAL, AGA J.A. (1985). Fullers earth and fired clay as adsorbents for dye stuffs. Equilibrium and Rate constants. *Water, Air, Soil Pollution* 24 (307–322).
- [7] OZKAYA, B. (2006). Adsorption and desorption of phenol on activated carbon and a comparison of isotherm models. *Journal of Hazardous Materials*, B129 (158-16).

- [8] HO, Y., OFOMAJA, A. (2006). Kinetic studies of copper ion adsorption on palm kernel fibre. *Journal of Hazardous Materials*, B137 (1796–1802).
- [9] HOSSAIN, M. (2012). Palm oil fruit shells as biosorbent for copper removal from water and wastewater: Experiments and sorption models. *Bioresource Technology*, 113 (97-101).
- [10] ROOP, CHAND, BANSAL, & MEENAKSHI, GOYAL. (2005). *Activated Carbon Adsorption*. Taylor & Francis Group .3, 11.
- [11] TANTHAPANICHAKOON, W., ARIYADEJWANICH, P., JAPTHONG, P., NAKAGAWA, K., MUKAI, S.R., & TAMON, H. (2005). Adsorption-desorption characteristics of phenol and reactive dyes from aqueous solution on mesoporous activated carbon prepared from waste tires. *Water Research* 39 (1347-1353).
- [12] ARIYADEJWANICH, P., TANTHAPANICHAKOON, W., NAKAGAWA, K., MUKAI, S.R., TAMON, H. (2003). Preparation and characterization of mesoporous activated carbon from waste tires. *Carbon* 41(157–164).
- [13] TAMON, H., NAKAGAWA, K., SUZUKI, T., NAGANO, S. (1999). Improvement of mesoporosity of activated carbons from PET by novel pre-treatment from steam activation. *Carbon* 37 (1643–1645).
- [14] MCCABE, W.L., SMITH, J.C., & HARRIOT, P. (1991) *Operaciones unitarias en ingeniería química* 4ta edición. McGraw-Hill.
- [15] PERRY (1992). *Manual del ingeniero químico* 6ta edición. McGraw -Hill.
- [16] DI NATALE, F., ERTO, A., LANCIA, A., & MUSMARRA, A. (2009). Descriptive model for metallic ions adsorption from aqueous solutions onto activated carbons. *Journal of Hazardous Materials* 169 (360–369).

- [17] KUMAR, DJAMEL, & BELAID. (2013). Adsorption kinetics of some textile dyes onto granular activated carbon. *Journal of Hazardous Materials* 1 (496–503).
- [18] DRISS, S.B. (2010). Aprovechamiento de hueso de aceituna: Biosorción de iones metálicos. España, Tesis doctoral. Universidad de Granada. Departamento de Ingeniería Química.
- [19] SRAVANTHI LOGANATHAN, MAYUR TIKMANI, SATYANNARAYANA EDUBILLI, AAKANKSHA MISHRA & ALOKE KUMAR GHOSHAL. (2014). CO₂ adsorption kinetics on mesoporous silica under wide range of pressure and temperature *Chemical Engineering Journal* 256 (1–8).
- [20] CHEUNG, C.W., PORTER, J.F. & MCKAY G. (2001). Sorption kinetic analysis for the removal of cadmium ions from effluents using bone char. *Water Research*, 35 (605-612).
- [21] KADIVERLU, K., KARTHIKA, C., VENNILAMANI, N., & S. PATTABHI. (2005). Activated carbon from industrial solid waste as an adsorbent for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution: Kinetic and equilibrium studies. *Chemosphere* 60 (1009–1017).
- [22] HASNAIN, M. (2008). Removal of chromium (VI) from aqueous solution using treated oil palm fiber. *Journal of Hazardous Materials*, 152 (662-668).
- [23] KHALED A. (2009). Treatment of artificial textile dye effluent containing Direct Yellow 12 by orange peel carbon. *Desalination*, 238 (210-232).
- [24] QING-SONG LIU, TONG ZHENG, & PENG WANG. (2010). Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers. *Chemical Engineering Journal*, 157 (348-356).

[25] KAMAL, N. (2009). Removal of direct blue-106 dye from aqueous solution using new activated carbons developed from pomegranate peel: Adsorption equilibrium and kinetics. *Journal of Hazardous Materials* 165 (52–62).

[26] HONGLAN, SHI. (2012). pH effects on the adsorption of saxitoxin by powdered activated carbon. *Harmful Algae*, 19 (61–67).

[27] LI LI, SHUANGXI LIU & TAN ZHU. (2010). Application of activated carbon derived from scrap tires for adsorption of Rhodamine B. *Journal of Environmental Sciences* 22(8) (1273–1280).

[28] FERHAN, C., & ÖZGÜR, A. (2011). *Activated Carbon for Water and Wastewater Treatment*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.

[29] DAVIS, A.C., WU, P., ZHANG, X.F., HOU, X.D., & JONES, B.T. (2006). Determination of cadmium in biological samples. *Applied Spectroscopy Reviews*, 41 (35–75).

[30] PERLA, ESMERALDA. (2012). Efectos del cadmio en la salud humana. *Revista Española Medicina Quirúrgica*, 17 (35-43).

[31] ANDRADE, M.A., & MESTRE, A.S. (2004). Activated carbons prepared from industrial pre-treated cork: Sustainable adsorbents for pharmaceutical compounds removal. *Chemical Engineering Journal*, 253 (408-417).

[32] MORCALI, M.H., ZEYTUNCU, A., BAYSAL, S., AKMAN & YUCEL, O. (2014). Adsorption of copper and zinc from sulfate media on a commercial sorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. *Impress*

[33] ARAMI, M., & SALEHI, R. (2005). Dye removal from colored textile wastewater using chitosan in binary systems. *Desalination*, 267 (64-72).

[34] MUKHERJEE, S., KUMAR, S., & FAN, M. (2007). Removal of phenols from water environment by activated carbon, bagasse ash and wood charcoal. *Chemical Engineering Journal*, 129 (133-142).

[35] SAAD M. ALSHEHRI, MU. NAUSHAD, TANSIR AHAMAD, ZEID A. ALOTHMAN & ALI ALDALBAHI. (2014). Synthesis, characterization of curcumin based ecofriendly antimicrobial bio-adsorbent for the removal of phenol from aqueous medium. *Chemical Engineering Journal*, 254 (81-189).

[36] HANK, D., AZI A., HOCINE, A., CHAALAL, O., & HELLAL, A. (2014). Optimization of phenol adsorption on to bentonite by factorial design methodology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (2256-2263).

[37] ALLEN L. WEBSTER. (2001) "Estadística aplicada a los negocios y la economía", 3^{ra} edición, editorial McGraw-Hill.

[38] 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).

[39] GHASEMI, M., NAUSHAD, M., GHASEMI, N & Y. KHOSRAVI-FARD. (2014). Adsorption of Pb(II) from aqueous solution using new adsorbents prepared from agricultural waste: Adsorption isotherm and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 42 (160-173).

[40] THOMAS, W., JOHN & CRITTENDEN, BARRY. (1998) *Adsorption Technology and Design*. Jordan Hill, GBR: Butterworth-Heinemann.

[41] EFTEKHARI, S., HABDI-YANGJEH, A., & SOHRABNEZHAD S.H. (2010). Application of PHB activated carbon for competitive adsorption of methylene blue

and rhodamine b: thermodynamic and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 178 (340-355).

[42] HAMDY, M.H., ASHRAF A.G, & EL-SAYED, A. (2009). Activated carbon from agricultural by-products for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 126 (778-783).

[43] BHATNAGAR, A. & JAIN, A. K. (2005). A comparative adsorption study with different industrial wastes as adsorbents for the removal of cationic dyes from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 281 (49–55).

[44] SELVAM, P., PREETHI, S., BASAKARALINGAM, P., THINAKARAN, N., SIVASAMY, A., & SIVANESAN, S. (2008). Removal of Rhodamine B from aqueous solution by adsorption onto sodium montmorillonite. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1-2) (39–44).

[45] SURESHKUMAR, M V., NAMASIVAYAM C. (2008). Adsorption behavior of direct Red 12B and Rhodamine B from water onto surfactant-modified coconut coir pith. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 317 (1-3): (277–283).

[46] TSENG, R.L., TSENG, S.K. (2005). Pore structure and adsorption performance of KOH activated carbons prepared from corncob. *Journal of Colloid Interface Science*. 287, 4 (28-437).

[47] GUO Y P, ZHAO J Z, ZHANG H, YANG S F, QI J R, WANG Z C. (2005). Use of rice husk-based porous carbon for adsorption of Rhodamine B from aqueous solutions. *Dyes and Pigments*, 66(2) (123–128).

[48] LILIANA GIRALDO., JUAN CARLOS MORENO & PIRAJÁN B. (2014). Study of adsorption of phenol on activated carbons obtained from egg shells. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 34 (377-385).

[49] LORENC-GRABOWSKA, A., GRYGLEWICZ, G.A., & DIEZ, B.M.A. (2013). Kinetics and equilibrium study of phenol adsorption on nitrogen-enriched activated carbons. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5 (355-362).

[50] JUANG, R.S., WU, F.C., & SENG, R.L. (2000). Mechanism of adsorption of phenols and dyes from water using activated carbons prepared from plum kernels. *Journal of Colloid Interface Science*. 227 (437-444).

[51] KENNEDY, L.J., VIJAYA, J.J., KAYALVIZHI, K., SEKARAN, G. (2007). Adsorption of phenol from aqueous solutions using mesoporous carbon prepared by two-stage process. *Journal of Hazardous Materials*. 132 (279- 287).

[52] SRIVASTAVA, V.C., SWAMY, M.M., MALL, I.D., PRASAD, B., & MISHRA, I.M. (2006). Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 272(89-104).

[53] KULEYIN, A., (2009). Removal of phenol and 4-chlorophenol by surfactant-modified natural zeolite. *Journal of Hazardous Materials*. 144 (307-315).

[54] LEYVA, R., RANGEL, J., MENDOZA, J., FUENTES, L., & GUERRERO, R. (1997). Adsorption of cadmium (II) from aqueous solution onto activated carbón. *Water Science And Technology*, 35(205-211).

ANEXOS

ANEXO A. DIAGRAMAS DE ESPECIACIÓN DE CADMIO Y COBRE

El pH de una solución acuosa, es un parámetro de control importante en el proceso de la adsorción, ya que nos permite conocer qué forma iónica puede adoptar el metal en la solución a tratar y en qué forma iónica precipitará.

DIAGRAMA DE ESPECIACIÓN DE COBRE (Cu).

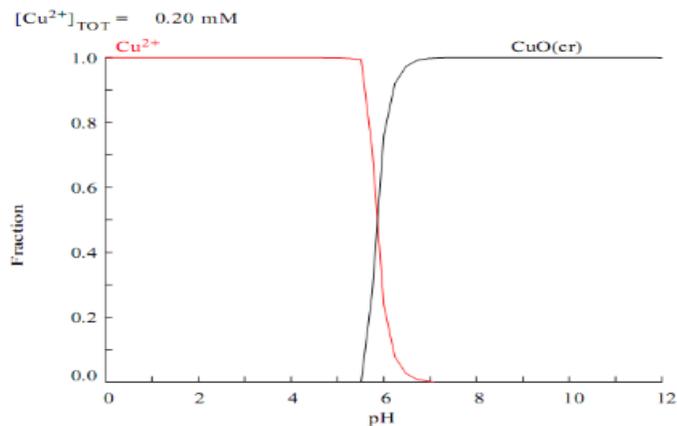
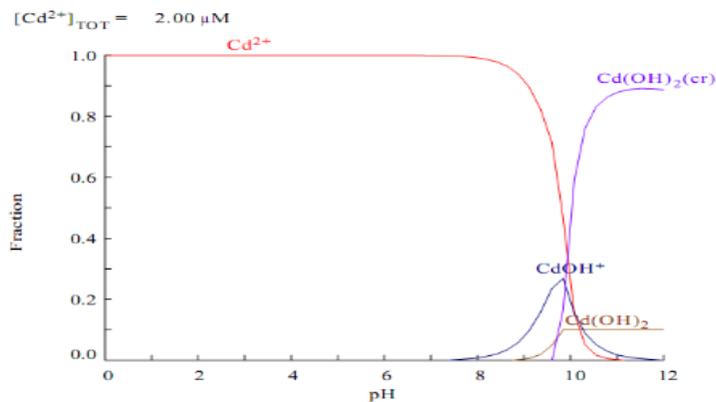


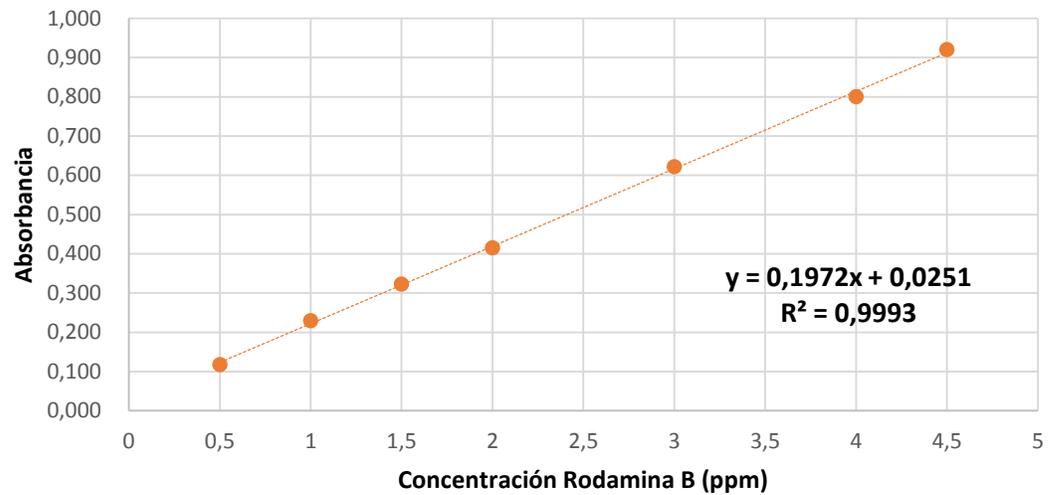
DIAGRAMA DE ESPECIACIÓN DE CADMIO (Cd).



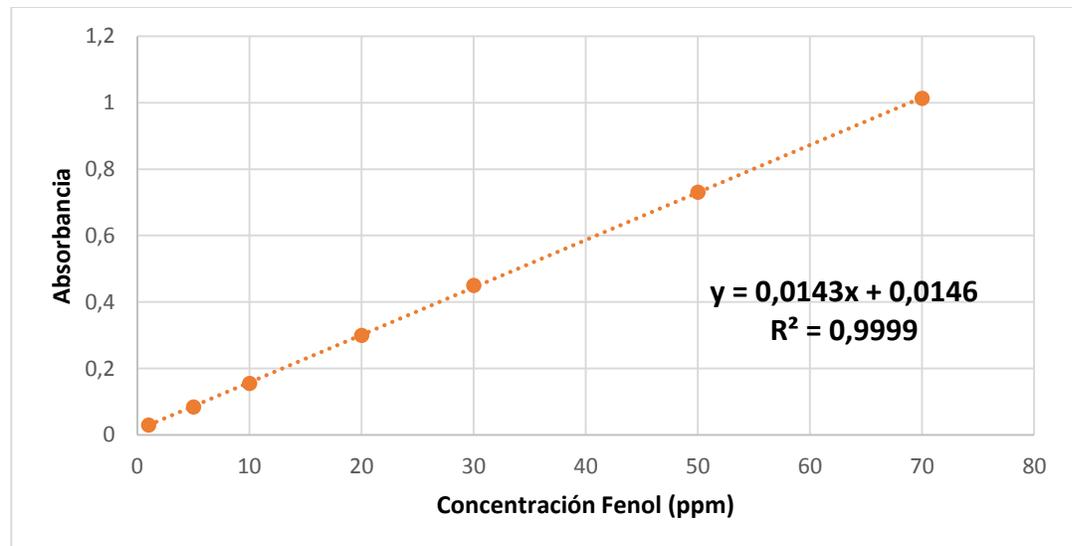
Diagramas extraídos de: Isern, R., Martínez, M. (2011). Estudio experimental de la movilidad de metales pesados en sedimentos de la cuenca del Jequetepeque, Perú. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Química.

ANEXO B. CURVAS DE CALIBRACIÓN

RODAMINA B



FENOL



ANEXO C. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA RhB (CC)

Muestra	t (min)	Relación Carbon/RhB (g/ml)	Ci (ppm)	Abs Prom.
1	3 Agitador, 4 Centrifuga, 8	0,05/25	50	0,143
Duplicado 1	3 Agitador, 4 Centrifuga, 8	0,05/25	50	0,1245
2	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,05/25	50	0,063
Duplicado 2	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,05/25	50	0,055
3	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,05/25	50	0,0445
Duplicado 3	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,05/25	50	0,0395
4	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,05/25	50	0,031
Duplicado 4	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,05/25	50	0,029
5	15 Agitador, 4 Centrifuga, 20	0,05/25	50	0,0265
Duplicado 5	15 Agitador, 4 Centrifuga, 20	0,05/25	50	0,027
6	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,05/25	50	0,0395
Duplicado 6	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,05/25	50	0,0415

Regresión	Cf (ppm)	Cantidad Absorbida (ppm)	mg RhB/g Carbon	Peso Carbón (g)	t (min)
			0		0
0,598	11,957	38,043	19,021	0,05	3
0,504	10,081	39,919	19,840	0,0503	3
0,190	3,793	46,207	22,966	0,0503	5
0,152	3,032	46,968	23,437	0,0501	5
0,098	1,968	48,032	23,968	0,0501	7
0,073	1,460	48,540	24,173	0,0502	7
0,030	0,598	49,402	24,505	0,0504	10
0,020	0,396	49,604	24,412	0,0508	10
0,007	0,142	49,858	24,585	0,0507	15
0,010	0,193	49,807	24,706	0,0504	15
0,073	0,073	49,927	24,716	0,0505	30
0,083	0,083	49,917	24,909	0,0501	30

ANEXO D. DATOS EXPERIMENTALE ISOTERMA RhB (CC).

Ci (ppm)	Dilución	Peso del Carbon (g)	Absorbancia promedio	Regresión	Cf (ppm)	Cantidad Absorbida (ppm)	qe (mg RhB/g carbon)
0							0,000
50	-	0,0504	0,036	0,055	0,055	49,945	24,774
Duplicado 50	-	0,0503	0,038	0,063	0,063	49,937	24,820
100	1:20	0,0507	0,281	1,295	25,903	74,097	36,537
Duplicado 100	1:20	0,0505	0,288	1,333	26,663	73,337	36,305
150	1:30	0,0505	0,459	2,200	66,009	83,991	41,580
Duplicado 150	1:30	0,0503	0,456	2,183	65,477	84,523	42,010
200	1:30	0,0506	0,792	3,886	116,592	83,408	41,209
Duplicado 200	1:30	0,0504	0,789	3,874	116,212	83,788	41,562
300	1:50	0,0505	0,877	4,317	215,872	84,128	41,647
Duplicado 300	1:50	0,0504	0,872	4,295	214,731	85,269	42,296
350	1:70	0,0507	0,760	3,727	260,867	89,133	43,951114
Duplicado 350	1:70	0,0504	0,770	3,775	264,239	85,761	42,540005
400	1:80	0,0507	0,783	3,841	307,262	92,738	45,728963
Duplicado 400	1:80	0,0505	0,784	3,848	307,870	92,130	45,608821

ANEXO E. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA RhB (CL).

Muestra	Tiempo (min)	Relación Carbon/RhB (g/ml)	Ci (ppm)	Absorbancia Promedio
1	3 Agitador, 4 Centrifuga, 8	0,05/25	50	0,314
Duplicado 1	3 Agitador, 4 Centrifuga, 8	0,05/25	50	0,343
2	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,05/25	50	0,280
Duplicado 2	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,05/25	50	0,261
3	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,05/25	50	0,2565
Duplicado 3	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,05/25	50	0,241
4	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,05/25	50	0,211
Duplicado 4	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,05/25	50	0,202
5	15 Agitador, 4 Centrifuga, 20	0,05/25	50	0,2035
Duplicado 5	15 Agitador, 4 Centrifuga, 20	0,05/25	50	0,198
6	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,05/25	50	0,129
Duplicado 6	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,05/25	50	0,1595
7	45 Agitador, 4 Centrifuga, 50	0,05/25	50	0,117
Duplicado 7	45 Agitador, 4 Centrifuga, 50	0,05/25	50	0,120
8	60 Agitador, 4 Centrifuga, 65	0,05/25	50	0,110
Duplicado 8	60 Agitador, 4 Centrifuga, 65	0,05/25	50	0,119
9	120 Agitador, 4 Centrifuga, 125	0,05/25	50	0,091
Duplicado 9	120 Agitador, 4 Centrifuga, 125	0,05/25	50	0,099

Regresión	Cf (ppm)	Cantidad Absorbida (ppm)	mg RhB/g Carbon	Peso Carbon (g)	t (min)
			0		0
1,465	29,300	20,700	10,329	0,0501	3
1,612	32,241	17,759	8,844	0,0502	3
1,293	25,852	24,148	12,002	0,0503	5
1,196	23,925	26,075	13,012	0,0501	5
1,173	23,469	26,531	13,187	0,0503	7
1,095	21,897	28,103	13,940	0,0504	7
0,943	18,854	31,146	15,449	0,0504	10
0,897	17,941	32,059	15,934	0,0503	10
0,905	18,093	31,907	15,858	0,0503	15
0,877	17,535	32,465	16,040	0,0506	15
0,527	10,538	39,462	19,653	0,0502	30
0,682	13,631	36,369	18,076	0,0503	30
0,466	9,320	40,680	20,099	0,0506	45
0,479	9,574	40,426	19,973	0,0506	45
0,428	8,560	41,440	20,474	0,0506	60
0,476	9,523	40,477	20,158	0,0502	60
0,334	6,684	43,316	21,615	0,0501	120
0,375	7,495	42,505	21,042	0,0505	120

ANEXO F. DATOS EXPERIMENTALES ISOTERMA RhB (CL).

Ci (ppm)	Dilución	Peso del Carbon (g)	Absorbancia promedio	Regresión	Cf (ppm)	Cantidad Absorbida (ppm)	qe (mg RhB/g carbon)
0							0,000
25	1:1	0,0504	0,198	0,877	0,877	24,123	11,966
Duplicado 25	1:1	0,0501	0,202	0,897	0,897	24,103	12,027
50	1:20	0,0502	0,132	0,540	10,791	39,209	19,526
Duplicado 50	1:20	0,0502	0,121	0,484	9,675	40,325	20,082
100	1:20	0,0500	0,490	2,355	47,099	52,901	26,450
Duplicado 100	1:20	0,0505	0,482	2,314	46,288	53,712	26,590
150	1:30	0,0505	0,586	2,844	85,330	64,670	32,015
Duplicado 150	1:30	0,0503	0,585	2,837	85,101	64,899	32,256
200	1:30	0,0504	0,881	4,338	130,132	69,868	34,657
Duplicado 200	1:30	0,0504	0,882	4,343	130,284	69,716	34,581
300	1:50	0,0503	0,926	4,566	228,296	71,704	35,638
Duplicado 300	1:50	0,0505	0,910	4,485	224,239	75,761	37,505
350	1:70	0,0504	0,808	3,968	277,728	72,272	35,849
Duplicado 350	1:70	0,0505	0,809	3,973	278,083	71,917	35,602
400	1:80	0,0504	0,822	4,039	323,083	76,917	38,153
Duplicado 400	1:80	0,0504	0,824	4,051	324,097	75,903	37,650

ANEXO G. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA FENOL (CC).

Muestra	Tiempo (min)	Relación Carbon/fenol (g/ml)	Ci (ppm)	Absorbancia Promedio
1	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,1/25	50	0,101
Duplicado	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,1/25	50	0,093
2	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,1/25	50	0,089
Duplicado	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,1/25	50	0,093
3	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,1/25	50	0,069
Duplicado	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,1/25	50	0,086
4	20 Agitador, 4 Centrifuga, 25	0,1/25	50	0,046
Duplicado	20 Agitador, 4 Centrifuga, 25	0,1/25	50	0,078
5	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,1/25	50	0,037
Duplicado	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,1/25	50	0,066
6	60 Agitador, 4 Centrifuga, 65	0,1/25	50	0,031
Duplicado	60 Agitador, 4 Centrifuga, 65	0,1/25	50	0,052
7	120 Agitador, 4 Centrifuga, 125	0,1/25	50	0,029
Duplicado	120 Agitador, 4 Centrifuga, 125	0,1/25	50	0,050
8	180 Agitador, 4 Centrifuga, 185	0,1/25	50	0,028
Duplicado	180 Agitador, 4 Centrifuga, 185	0,1/25	50	0,048
9	240 Agitador, 4 Centrifuga, 245	0,1/25	50	0,026
Duplicado	240 Agitador, 4 Centrifuga, 245	0,1/25	50	0,046

Regresión	Cf (ppm)	Cantidad Absorbida (ppm)	qe [mg Fenol/g Carbon]	Peso Carbon (g)	t (min)
6,042	6,042	43,958	10,913	0,1007	5
5,483	5,483	44,517	11,096	0,1003	5
5,203	5,203	44,797	11,188	0,1001	7
5,483	5,483	44,517	11,107	0,1002	7
3,769	3,769	46,231	11,466	0,101	10
4,993	4,993	45,007	11,229	0,100	10
2,161	2,161	47,839	11,948	0,100	20
4,399	4,399	45,601	11,366	0,100	20
1,566	1,566	48,434	12,060	0,100	30
3,594	3,594	46,406	11,532	0,101	30
1,112	1,112	48,888	12,222	0,100	60
2,615	2,615	47,385	11,834	0,100	60
1,007	1,007	48,993	12,236	0,100	120
2,441	2,441	47,559	11,866	0,100	120
0,937	0,937	49,063	12,241	0,100	180
2,336	2,336	47,664	11,845	0,101	180
0,797	0,797	49,203	12,252	0,100	240
2,196	2,196	47,804	11,951	0,100	240

ANEXO H. DATOS EXPERIMENTALES ISOTERMA FENOL (CC).

Muestra	Peso Carbon (g)	Dilución	Relación carbon/ fenol (g/ml)	Ci (ppm)	Absorbancia promedio	Regresión	Cf (ppm)	Cantidad absorbida (ppm)	qe [mg Fenol/ g Carbon]
1	0,1008	1:1	0,1/25	30	0,002	-0,8811	0,0000	30,0000	7,4405
Duplicado	0,1005	1:1	0,1/25	30	0,0025	-0,8462	0,0000	30,0000	7,4627
2	0,1006	1:1	0,1/25	50	0,0275	0,9021	0,9021	49,0979	12,2013
Duplicado	0,1003	1:1	0,1/25	50	0,0295	1,0420	1,0420	48,9580	12,2029
3	0,1002	1:1	0,1/25	70	0,032	1,2168	1,2168	68,7832	17,1615
Duplicado	0,1	1:1	0,1/25	70	0,031	1,1469	1,1469	68,8531	17,2133
4	0,1003	1:1	0,1/25	100	0,0385	1,6713	1,6713	98,3287	24,5086
Duplicado	0,1005	1:1	0,1/25	100	0,0405	1,8112	1,8112	98,1888	24,4251
5	0,1002	1:1	0,1/25	200	0,19	12,2657	12,2657	187,7343	46,8399
Duplicado	0,1005	1:1	0,1/25	200	0,195	12,6154	12,6154	187,3846	46,6131
6	0,1006	1:1	0,1/25	300	0,212	13,8042	13,8042	286,1958	71,1222
Duplicado	0,1004	1:1	0,1/25	300	0,2165	14,1189	14,1189	285,8811	71,1855
7	0,1006	1:1	0,1/25	400	0,632	43,1748	43,1748	356,8252	88,6742
Duplicado	0,1005	1:1	0,1/25	400	0,626	42,7552	42,7552	357,2448	88,8669
8	0,1003	1:20	0,1/25	600	0,154	9,748	194,965	405,035	100,956
Duplicado	0,1006	1:20	0,1/25	600	0,1525	9,643	192,867	407,133	101,176
9	0,1004	1:20	0,1/25	800	0,248	16,322	326,434	473,566	117,920
Duplicado	0,1004	1:20	0,1/25	800	0,251	16,531	330,629	469,371	116,875
10	0,1002	1:20	0,1/25	1000	0,3855	25,937	518,741	481,259	120,075
Duplicado	0,1003	1:20	0,1/25	1000	0,3815	25,657	513,147	486,853	121,349

ANEXO I. DATOS EXPERIMENTALES CINETICA FENOL (CL).

Muestra	Tiempo (min)	Relación Carbon/fenol (g/ml)	Ci (ppm)	Absorbancia Promedio
1	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,1/25	50	0,6065
Duplicado	5 Agitador, 4 Centrifuga, 10	0,1/25	50	0,6095
2	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,1/25	50	0,6035
Duplicado	7 Agitador, 4 Centrifuga, 12	0,1/25	50	0,585
3	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,1/25	50	0,592
Duplicado	10 Agitador, 4 Centrifuga, 15	0,1/25	50	0,584
4	20 Agitador, 4 Centrifuga, 25	0,1/25	50	0,570
Duplicado	20 Agitador, 4 Centrifuga, 25	0,1/25	50	0,581
5	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,1/25	50	0,565
Duplicado	30 Agitador, 4 Centrifuga, 35	0,1/25	50	0,568
6	60 Agitador, 4 Centrifuga, 65	0,1/25	50	0,560
Duplicado	60 Agitador, 4 Centrifuga, 65	0,1/25	50	0,566
7	120 Agitador, 4 Centrifuga, 125	0,1/25	50	0,560
Duplicado	120 Agitador, 4 Centrifuga, 125	0,1/25	50	0,570
8	180 Agitador, 4 Centrifuga, 185	0,1/25	50	0,567
Duplicado	180 Agitador, 4 Centrifuga, 185	0,1/25	50	0,575
9	240 Agitador, 4 Centrifuga, 245	0,1/25	50	0,578
Duplicado	240 Agitador, 4 Centrifuga, 245	0,1/25	50	0,572

Regresión	Cf (ppm)	Cantidad Absorbida (ppm)	qe [mg Fenol/g Carbon]	Peso Carbon (g)	t (min)
41,392	41,392	8,608	2,139	0,1006	5
41,601	41,601	8,399	2,093	0,1003	5
41,182	41,182	8,818	2,196	0,1004	7
39,888	39,888	10,112	2,515	0,1005	7
40,378	40,378	9,622	2,406	0,1000	10
39,818	39,818	10,182	2,533	0,1005	10
38,839	38,839	11,161	2,779	0,1004	20
39,573	39,573	10,427	2,601	0,1002	20
38,455	38,455	11,545	2,875	0,1004	30
38,699	38,699	11,301	2,808	0,1006	30
38,105	38,105	11,895	2,956	0,1006	60
38,559	38,559	11,441	2,846	0,1005	60
38,105	38,105	11,895	2,971	0,1001	120
38,839	38,839	11,161	2,774	0,1006	120
38,629	38,629	11,371	2,826	0,1006	180
39,154	39,154	10,846	2,695	0,1006	180
39,399	39,399	10,601	2,648	0,1001	240
38,944	38,944	11,056	2,753	0,1004	240

ANEXO J. DATOS EXPERIMENTALES ISOTERMA FENOL (CL).

Muestra	Peso Carbon (g)	Dilución	Relación carbon/ fenol (g/ml)	Ci (ppm)	Absorbancia promedio	Regresión	Cf (ppm)	Cantidad absorbida (ppm)	qe [mg Fenol/ g Carbon]
1	0,1001	1:1	0,1/25	30	0,345	23,1049	23,1049	6,8951	1,7221
Duplicado	0,1002	1:1	0,1/25	30	0,3565	23,9091	23,9091	6,0909	1,5197
2	0,1005	1:1	0,1/25	50	0,5585	38,0350	38,0350	11,9650	2,9764
Duplicado	0,1006	1:1	0,1/25	50	0,5555	37,8252	37,8252	12,1748	3,0256
3	0,1002	1:1	0,1/25	70	0,7545	51,7413	51,7413	18,2587	4,5556
Duplicado	0,1003	1:1	0,1/25	70	0,7615	52,2308	52,2308	17,7692	4,4290
4	0,1002	1:20	0,1/25	100	0,0685	3,7692	75,3846	24,6154	6,1416
Duplicado	0,1001	1:20	0,1/25	100	0,064	3,4545	69,0909	30,9091	7,7196
5	0,1004	1:20	0,1/25	200	0,1185	7,2657	145,3147	54,6853	13,6169
Duplicado	0,1008	1:20	0,1/25	200	0,119	7,3007	146,0140	53,9860	13,3894
6	0,1004	1:20	0,1/25	300	0,1865	12,0210	240,4196	59,5804	14,8358
Duplicado	0,1004	1:20	0,1/25	300	0,1885	12,1608	243,2168	56,7832	14,1392
7	0,1003	1:20	0,1/25	400	0,26	17,1608	343,2168	56,7832	14,1533
Duplicado	0,1003	1:20	0,1/25	400	0,259	17,0909	341,8182	58,1818	14,5019