

**MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE ADSORCIÓN EN  
MODO CONTINUO PARA LA EVALUACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS  
OBTENIDOS DE LLANTAS USADAS**

**LILIANA PAOLA MARTÍNEZ MORA  
DIANA CAROLINA RAMÍREZ QUINTANA**

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

**2014**

**MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DE UN SISTEMA DE ADSORCIÓN EN  
MODO CONTINUO PARA LA EVALUACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS  
OBTENIDOS DE LLANTAS USADAS**

**LILIANA PAOLA MARTÍNEZ MORA  
DIANA CAROLINA RAMÍREZ QUINTANA**

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

**Director  
Dra. DEBORA ALCIDA NABARLATZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos las mejores condiciones para la ejecución del presente trabajo de grado.

A nuestra cálida directora de proyecto, Dra. Debora Nabarlatz, por brindarnos la oportunidad de desarrollar este proyecto creyendo en nosotras, con sus enseñanzas, comprensión y dedicación nos permitió la finalización de esta meta.

A la Dra. Paola Maradei, su orientación, apoyo y consejos fueron indispensables en la solución de los problemas enfrentados durante todo su desarrollo.

Al grupo de investigación INTERFASE, en especial al Ing. Sebastián, la Ing. Claudia y la Ing. Liliana, por acogernos amigablemente. Su sonrisa y apoyo estuvieron presentes siempre, aportaron las mejores motivaciones e ideas en los momentos difíciles.

Al grupo de investigación CICAT, ellos fueron un apoyo incondicional estando a disposición en la respuesta a nuestras inquietudes y facilitarnos la ejecución de las pruebas necesarias en su laboratorio.

Al Dr. Cristian Blanco por su vocación, interés y permitir el uso de los laboratorios de Química cuando fue necesario.

A todos los técnicos de laboratorios en especial a don Eduardo, don Guillermo y Wilson su sabiduría, experiencia y disposición durante toda la elaboración del presente trabajo nos facilitó el cumplimiento de los objetivos del mismo.

A la Dra. Edith Gutiérrez de la Universidad Autónoma del Estado de México, su deseo en ayudarnos junto a su conocimiento en el tema nos impulsó en la culminación del presente.

*Dedicado a,*

*A Dios porque me ha guiado por el camino de la vida y siempre me ha dado las mayores bendiciones para llegar a mis metas y sueños.*

*A mis padres, Guillermo Martínez y Martha Mora, que me han brindado lo mejor que tienen, me han ayudado a crecer como mujer, han apoyado y guiado en los momentos más importantes. Los amo con mi vida.*

*A mi hermana, Maritza Martínez, quien me ha dado muy buenos consejos y me ha ayudado en todo lo que puede. Gracias a ti, mi carácter académico se ha forjado.*

*A José Durán, el hombre que me ha sido mi amigo, mi maestro, mi confidente y mi pareja en las buenas y en los momentos difíciles durante estos años de estudio. Juntos por siempre.*

*A nuestra directora, la Dra Nabarlatz, gracias por sus enseñanzas, paciencia, confianza y buenos deseos, fue un placer trabajar de su mano.*

*A todos mis amigos, principalmente a Carito, Erika, Vannesa, Salena, Julian, Jhon, Luis E, Edinson y Sebastian. Cada uno apporto cosas muy buenas para mi vida tanto personal como académica. Gracias chic@s.*

*Liliana Paola Martínez Mora*

*Dedicado a,*

*A Dios por estar en cada paso de mi vida guiándome en cada decisión tomada  
y las bendiciones recibidas.*

*A mis padres por ser el motor en mi vida incentivándome cada día en el logro  
de mis metas con amor, enseñanza, comprensión, apoyo, esfuerzo y sacrificio.*

*A mis hermanos, a los que agradezco por bendecirme con su amada  
presencia, valor, amor, fidelidad, palabras, cariño y abrazos cálidos que  
siempre me envuelven. Son la alegría en mi vida.*

*A nuestra directora, la Dra. Debora Nabarlatz, por sus enseñanzas, creer en  
nosotras y confiar en este proyecto.*

*A mis amigos, personas inolvidables que estuvieron conmigo convirtiendo las  
dificultades en enseñanzas y alegrías.*

*Diana Carolina Ramírez Quintana*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS.....	19
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	19
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1. 2.. MARCO TEÓRICO.....	19
1.2.1. ADSORCIÓN.....	19
1.2.2. CARBÓN ACTIVADO.....	22
1.2.3. ADSORCIÓN EN MODO CONTINUO.....	23
2. METODOLOGÍA.....	26
2.1. ETAPA 1.....	26
2.1.1. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA EN CONTINUO..	26
2.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	28
2.2. ETAPA 2.....	29
2.2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	29
2.2.2. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE FENOL Y RODAMINA B.....	29
2.2.3. EXPERIMENTOS DE ADSORCIÓN EN LECHO FIJO.....	29
2.2.4. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE RODAMINA B Y FENOL.....	30
2.3. AJUSTE DEL MODELO.....	30

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA .....	32
3.2. ADSORCIÓN EN MODO CONTINUO DE FENOL.....	33
3.2.1. ADSORCIÓN DE FENOL: INFLUENCIA DE LA ALTURA.....	33
3.2.2. ADSORCIÓN DE FENOL: INFLUENCIA DEL CAUDAL.....	35
3.2.3. ADSORCIÓN DE FENOL: INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN.....	37
3.3. ADSORCIÓN EN MODO CONTINUO DE RODAMINA B.....	39
3.3.1. ADSORCIÓN DE RODAMINA B: INFLUENCIA DE LA ALTURA.....	39
3.3.2. ADSORCIÓN DE RODAMINA B: INFLUENCIA DEL CAUDAL.....	42
3.3.3. ADSORCIÓN DE RODAMINA B: INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN.....	43
3.4. COMPARACIÓN CON OTROS ADSORBENTES.....	45
CONCLUSIONES.....	47
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de isotermas de adsorción.....	20
Figura 2. Proceso de adsorción en continuo por medio de lecho fijo.....	24
Figura 3. Metodología utilizada en el trabajo de grado.....	27
Figura 4. Sistema en continuo.....	28
Figura 5. Curvas de ruptura para la adsorción de Fenol sobre CAL y CAC variando la altura del lecho.....	35
Figura 6. Curvas de ruptura para la adsorción de Fenol sobre CAL y CAC variando el caudal.....	36
Figura 7. Curvas de ruptura para la adsorción de Fenol sobre CAL y CAC variando la concentración inicial.....	38
Figura 8. Curvas de ruptura para la adsorción de Rodamina B sobre CAL y CAC variando la altura del lecho .....	41
Figura 9. Curvas de ruptura para la adsorción de Rodamina B sobre CAL y CAC variando el caudal.....	43
Figura 10. Curvas de ruptura para la adsorción de Rodamina B sobre CAL y CAC variando la concentración inicial.....	44

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Modelos matemáticos para la descripción curvas de ruptura.....	24
Tabla 2. Condiciones de operación del sistema de adsorción en modo continuo.....	30
Tabla 3. Características del carbón de llantas y del carbón comercial.....	32
Tabla 4. Parámetros de laisoterma de Langmuir para la adsorción de fenol en modo batch sobre e carbón activado correspondiente.....	33
Tabla 5. Parámetros de modelo de Hall para la adsorción de Fenol.....	39
Tabla 6. Parámetros de la isoterma de Langmuir para la adsorción de rodamina B en modo batch sobre el carbón activado correspondiente.....	39
Tabla 7. Parámetros de modelo de Hall para la adsorción de Rodamina B.....	45
Tabla 8. Comparación de puntos de ruptura y agotamiento para la adsorción de Fenol y Rodamina B en modo continuo.....	46

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. ANÁLISIS PRÓXIMO DE CARBÓN ACTIVADO LLANTAS (CAL).....	62
Anexo B. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL (CAC).....	63
Anexo C. CURVAS DE CALIBRACIÓN.....	64
Anexo D. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA DE FENOL SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO DE LLANTAS.....	65
Anexo E. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA DE FENOL SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.....	68
Anexo F. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA DE RODAMINA B SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO DE LLANTAS.....	73
Anexo G. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA DE RODAMINA B SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.....	78
Anexo H. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA DE FENOL SOBRE EL CARBÓN COMERCIAL GRANULAR.....	81

## RESUMEN

**TÍTULO:** Montaje y puesta en marcha de un sistema de adsorción en continuo para la evaluación de un carbón activado obtenido a partir de llantas usadas\*.

**AUTORES:** Liliana P. Martínez Mora, Diana C. Ramírez Quintana\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Lecho fijo, adsorción, curvas de ruptura, carbón activado, fenol, Rodamina B.

**CONTENIDO:** El presente trabajo muestra los resultados obtenidos para la adsorción de Fenol y Rodamina B sobre un carbón activado obtenido a partir de llantas usadas, comparándolo con un carbón activado comercial. Para esto se realizó el montaje y puesta en marcha de un sistema de adsorción en continuo de lecho fijo. Se evaluaron parámetros de operación como altura del lecho (18 mm y 9 mm), caudal ( $8 \text{ mL min}^{-1}$  y  $16 \text{ mL min}^{-1}$ ) y concentración de alimentación (20 ppm y 50ppm) para el carbón de llanta (CAL) y el carbón comercial (CAC) para la adsorción de Fenol y Rodamina B. En las curvas de ruptura obtenidas para la adsorción de Fenol se evidenció la afinidad que tiene el CAC por este compuesto orgánico mientras que el CAL no mostró un comportamiento deseable en este proceso, se evidencia que un cambio en la altura y en la concentración de alimentación afecta de manera relevante el punto de ruptura y agotamiento. Mientras que, en la adsorción de Rodamina B fue el CAL quien mostró una mayor adsorción a diferencia del CAC, encontrando que el cambio en la concentración de alimentación fue el factor que muestra mayor cambio en el comportamiento de las curvas de ruptura principalmente por el punto de agotamiento. Se usó el modelo de Hall para predecir el comportamiento de estos experimentos, el cual se ajustó de manera apropiada para los procesos de adsorción de Fenol con los dos tipos de carbones y para la adsorción de Rodamina B con CAL ( $R^2 > 0,99$ ), sin embargo esto no sucedió para la adsorción de Rodamina B con CAC siendo esto atribuido a las condiciones de operación, principalmente al caudal y el tiempo de residencia del soluto dentro de la columna, el cual parece no ser suficiente para permitir la adsorción.

\* Trabajo de grado

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

## ABSTRACT

**TÍTULO:** Installation and start up of an adsorption continuous system for the evaluation of an activated carbon obtained from waste tires\*.

**AUTORES:** Liliana P. Martínez Mora, Diana C. Ramírez Quintana\*\*.

**PALABRAS CLAVES:** Fixed bed, adsorption, breakthrough curves, activated carbon, Phenol, Rhodamine B .

**CONTENIDO:** This paper shows the results obtained for the adsorption of Rhodamine B and Phenol on an activated carbon obtained from used tires (CAL), compared with a commercial activated carbon (CAC), in a continuous operation adsorption process in fixed bed. Operational parameters such as bed height (18 mm and 9 mm), flow (8 mL min<sup>-1</sup> and 16 mL min<sup>-1</sup>) and feed concentration (20 ppm and 50 ppm) were evaluated for the adsorption of phenol and Rhodamine B over both activated carbon. The breakthrough curves obtained showed that the adsorption of phenol over CAC has affinity for the organic compound CAC evidenced while not show behavior CAL desirable in this process, it is evident that a change in the height and the concentration of power in a relevant way affects the breakpoint and exhaustion. Conversely, the adsorption of Rhodamine B was the CAL who showed greater adsorption unlike the CAC, finding that the change in feed concentration was the factor that shows a major change in the behavior of the breakthrough curves mainly the point of exhaustion. Hall model was used to predict the behavior of these experiments which are adjusted appropriately for the process modeling Phenol adsorption with both types of coals, and for adsorption of Rhodamine B with CAL ( $R^2 > 0,99$ ), however this did not happen for the adsorption of Rhodamine B with CAC this being attributed to the operating conditions, mainly the flow.

\*Degree Work. Research Mode.

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

## NOMENCLATURA

- i. (CAL) Carbón activado obtenido a partir de la pirólisis de llantas.
- ii. (CAC) Carbón activado comercial.
- iii. (Rh B) Rodamina B.
- iv. ( $t^*$ ) Tiempo estequiométrico [h].
- v. ( $K_s$ ) Coeficiente global de transferencia de masa [ $h^{-1}$ ].
- vi. (%p/p) Porcentaje peso-peso [g/g]
- vii. (H) Altura del lecho [mm]
- viii. (Q) Caudal [mL/min]
- ix. ( $C_0$ ) Concentración inicial de la alimentación [ppm].
- x. ( $K_a$ ) Constante de equilibrio de adsorción [ $L \text{ mg}^{-1}$ ].
- xi. ( $Q_m$ ) Capacidad máxima de adsorción [mg/g de carbon].

## INTRODUCCIÓN

El agua es fuente de vida y energía, sin embargo millones de personas en el mundo están sufriendo con la escasez de agua potable, fresca y limpia. Uno de los principales causantes de la contaminación de los cuerpos de agua es la creciente actividad industrial. Grandes cantidades de contaminantes se liberan en las fuentes de agua tales como compuestos orgánicos volátiles, iones metálicos y colorantes, metales pesados, etc. Un ejemplo de esto es el fenol y sus derivados [1]. Los fenoles son considerados como contaminantes prioritarios, ya que son perjudiciales para los organismos a concentraciones bajas con amplia prevalencia en las aguas residuales [2, 3]. El fenol es tóxico y mutagénico a altas concentraciones y puede ser absorbido por el cuerpo humano a través de la piel [4]. La exposición excesiva al fenol puede causar efectos en la salud del cerebro, el sistema digestivo, ojos, corazón, hígado, pulmón, piel y otros órganos en los seres humanos [5].

Las principales fuentes de contaminación de fenol en el medio ambiente son las aguas residuales procedentes de la fabricación de pinturas, productos de limpieza, pesticidas e insecticidas, la conversión del carbón, resina polimérica, el acero, las industrias petroquímicas, la construcción de automóviles y electrodomésticos [4,6,7]. Por lo anterior la eliminación de fenol se ha convertido en una importante necesidad de protección del medio ambiente [8].

Otro contaminante presente en los efluentes industriales son los residuos derivados del uso de colorantes sintéticos, usados en el teñido de textiles, alimentos, flores, medicinas [9]. Estos son nocivos para el medio ambiente debido a que en los sistemas acuáticos pueden llegar a suprimir los procesos fotosintéticos [10], interfiriendo en los procesos de la vida acuática. Además se ha encontrado que los colorantes pueden causar daños severos en el ser humano, tales como disfunción en los riñones además de estar ligado al cáncer de vejiga y mama [11]. Los colorantes poseen una estructura molecular compleja, por lo que no son fácilmente biodegradables, lo cual hace difícil la degradación de estos al ser desechados [11]. La rodamina B es un colorante

catiónico rojo, de la clase de xantenos, soluble en agua, el cual es usado como trazador fluorescente en agua [12] y en la industria textil; anteriormente era usado como colorante de alimentos, sin embargo fue discontinuado debido a las sospechas de ser de naturaleza carcinógena [13].

Para la eliminación de este tipo de contaminantes existen diferentes técnicas, entre las que se encuentran el intercambio iónico, ósmosis inversa, coagulación, evaporación, filtración por membrana, ozonación y adsorción. La adsorción es un método que se destaca de los procesos anteriormente mencionados debido a su alta eficiencia. Sin embargo, el costo de los adsorbentes lo convierte en un proceso costoso, además de que su regeneración no siempre es posible. Dentro de los adsorbentes, el más utilizado es el carbón activado, por lo que se ha impulsado la búsqueda de carbones activados de menor costo, utilizando materias primas para su preparación como residuos industriales, agroindustriales, urbanos y demás. *Rangel y colaboradores* produjeron carbón activado a partir del bagazo del agave, desecho de la industria del mezcal en México [15]. Por otro lado, se obtuvo carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo [16]. *Giraldo y colaboradores* [1] consiguieron carbón activado a partir de cáscaras de huevo para adsorber fenol. Dado el crecimiento en la generación de llantas usadas (61000 toneladas de residuos de llantas de automóvil, camioneta, camión y buseta en el año 2008, según el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial), se plantea el uso de este residuo como materia prima para la preparación de carbón activado.

Se ha encontrado que la pirólisis de las llantas es un método potencialmente rentable, en el que se producen gas combustible, aceites y carbón [17]. A partir del carbón obtenido se puede producir carbón activado para usarlo como adsorbente de diferentes contaminantes como lo son el fenol y colorantes [18, 19, 20, 21, 22]. Para estudiar la capacidad de adsorción de los carbones activados se hace necesario conocer su comportamiento, característico de cada carbón dependiendo del material a adsorber, por medio de experimentos

en modo batch y en modo continuo para ofrecer así datos considerados esenciales para el diseño de adsorbedores industriales [23]. Por las razones anteriormente descritas, el presente trabajo de grado analiza el comportamiento de un carbón activado producido a partir de pirólisis y activación de llantas usadas, para ser utilizado como adsorbente de Fenol y Rodamina B, operando en modo continuo en un lecho fijo a escala laboratorio.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento del carbón activado elaborado a partir de llantas usadas como adsorbente de Fenol y Rodamina B, mediante pruebas a escala laboratorio en modo continuo, comparándolo con un carbón activado comercial.

#### **1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Implementar y poner en marcha el montaje de un sistema de adsorción en lecho fijo para operar en modo continuo a escala laboratorio.
2. Determinar las curvas de ruptura obtenidas a diferentes condiciones de operación, ajustándolas con modelos de curvas de ruptura encontrados en la literatura.
3. Comparar el desempeño del carbón activado obtenido a partir de llantas usadas con un carbón activado granular comercial para la adsorción de Fenol y Rodamina B.

## **1.2. MARCO TEÓRICO**

### **1.2.1. ADSORCIÓN**

La adsorción surge como resultado de las fuerzas moleculares insaturadas y desequilibradas que están presentes en cada superficie sólida. Por lo tanto, cuando una superficie sólida (adsorbente) se pone en contacto con un líquido o

gas, hay una interacción entre sus campos de fuerzas. La superficie sólida tiende a satisfacer estas fuerzas residuales atrayendo y reteniendo en su superficie las moléculas, átomos, o iones del gas o líquido (adsorbato). Esto da como resultado una mayor concentración del gas o líquido en las inmediaciones de la superficie sólida [24].

En la adsorción están involucradas dos tipos de fuerzas, clasificándola de las siguientes maneras, adsorción física o fisisorción y adsorción química o quimisorción. En la fisisorción el adsorbato está unido a la superficie por fuerzas de Van der Waals, similares a las fuerzas moleculares de cohesión involucradas en la condensación de vapores en líquidos donde las moléculas fisisorbidas mantienen su identidad molecular. En la quimisorción se da la formación de compuestos químicos dependiendo de la reactividad del adsorbente y adsorbato, la molécula quimisorbida pierde su identidad y no puede ser recuperada por desorción [25].

Este proceso opera por lotes en donde se suele usar para adsorber solutos de disoluciones líquidas cuando las cantidades tratadas son pequeñas como en la industria farmacéutica y otras; y en modo continuo para tratar grandes volúmenes. En este caso, el fluido y el adsorbente están en contacto en el equipo sin separaciones periódicas de la fase. Existen varias aplicaciones para la adsorción, por ejemplo para la remoción de metales pesados en aguas residuales [27, 28, 29] y tratamientos de lixiviados generados en los vertederos municipales en aguas residuales [30].

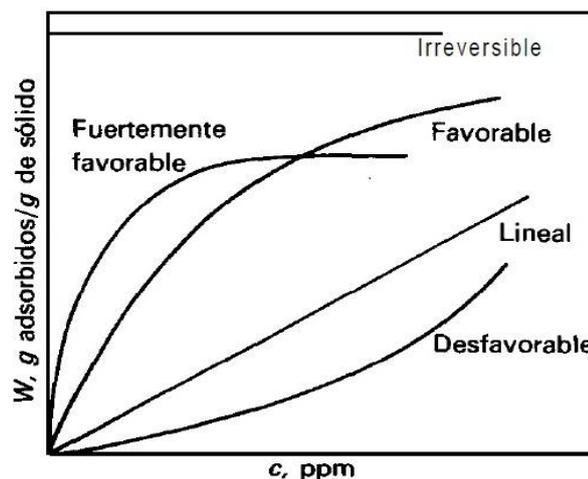
Para la descripción del equilibrio en el proceso de adsorción se utilizan las isotermas de adsorción donde se describe la relación entre la concentración de un soluto en la fase fluida, representado como  $c$  (kg de adsorbato/ $m^3$  de fluido), y su concentración en el sólido, representado como  $q$  (kg de adsorbato (solute)/kg de adsorbente (sólido)) [31].

Existen diversos modelos de isotermas que se ajustan apropiadamente a cada caso. Entre las más utilizadas, está la isoterma lineal la cual se puede expresar mediante una ecuación similar a la ley de Henry. Aunque esta isoterma no es

común en la región diluida se usa para aproximar los datos de muchos sistemas [31]. Otra isoterma representativa, es la isoterma de Langmuir en la cual se asume la sorción como un proceso químico que ocurre en los sitios de unión homogénea del material sorbente [32]. En el proceso se da la formación de monocapas [33], por lo que la isoterma asume que el proceso de sorción ocurre en la superficie del sorbente por los sitios heterogéneos con calores diferentes de sorción [33].

Se denominan isotermas favorables a aquellas que son convexas, debido a que puede obtenerse una carga relativamente elevada del sólido a una baja concentración en el fluido (por ejemplo la isoterma de Freundlich). En el caso límite de una isoterma muy favorable como lo es la isoterma de Langmuir, la cantidad adsorbida es casi independiente en la disminución de concentración hasta valores muy bajos. En el caso contrario, denominado isoterma desfavorable, la isoterma es cóncava hacia arriba debido a que se obtienen cargas del sólido relativamente bajas que conducen a largas zonas de transferencia de materia en el lecho [34]. En la figura 1 se presentan los diferentes tipos de isotermas de adsorción.

**Figura1.**Tipos de isotermas de adsorción [34].



### 1.2.2. CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es un término que incluye una amplia gama de materiales carbonosos amorfos que exhiben un alto grado de porosidad y un área de superficie entre partículas extendida. Se obtienen por combustión, combustión parcial, o descomposición térmica de una variedad de sustancias carbonosas. Los carbones activados pueden ser obtenidos en forma granular y en polvo. La forma granular tiene una gran área superficial interna y poros pequeños por otro lado, los polvos finos están asociados con un mayor diámetro de poro y una área superficial interna más pequeña [24].

Se ha encontrado que la adsorción con carbones activados es una técnica superior para el tratamiento de aguas residuales comparada con otras técnicas físicas o químicas como lo son la floculación, la coagulación, la precipitación y la ozonación debido a que tienen limitaciones inherentes. Sin embargo, el carbón activado comercial es considerado costoso y muchas veces no es posible lograr su regeneración [14], es por ello que ha incrementado el interés por producir carbones activados de fuentes renovables y más baratas provenientes de subproductos de la industria y agricultura [35, 36, 37,27].

Los carbones activados son principalmente y casi exclusivamente preparados por la pirólisis de materia prima carbonosa a temperaturas inferiores a 1000°C. La preparación implica dos pasos principales: la carbonización de la materia prima a temperaturas inferiores a 800°C en una atmósfera inerte, y la activación del producto carbonizado entre 950 y 1000°C. Durante la carbonización la mayor parte de los elementos se eliminan como productos gaseosos volátiles por la descomposición pirolítica de la materia prima. El proceso de activación convierte el material carbonizado en una forma que contiene el mayor número posible de poros distribuidos al azar de varias formas y tamaños, dando lugar a un producto con un área superficial extendida y extremadamente alta [24].

### 1.2.3. ADSORCIÓN EN MODO CONTINUO

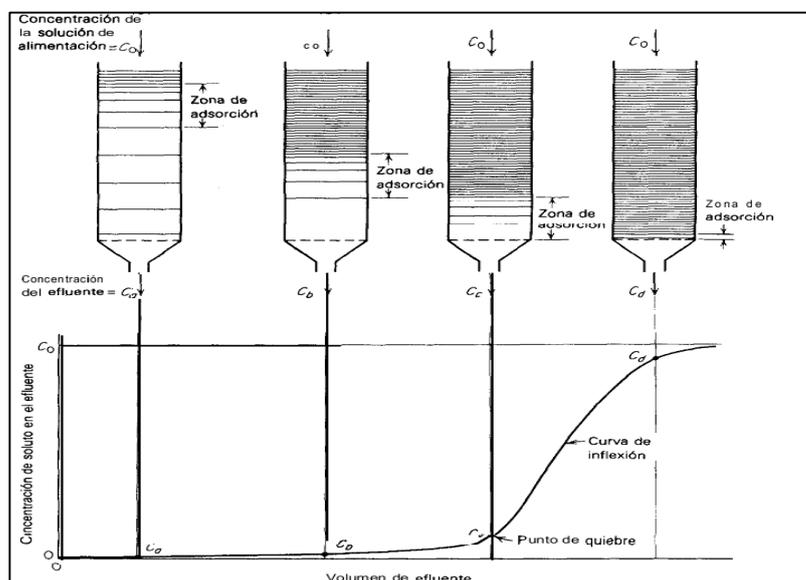
En el proceso de adsorción en modo continuo se hace uso de columnas de lecho fijo rellenas de adsorbente. En este modo de operación, la solución de adsorbato se hace pasar a través de la columna. En el inicio, el sólido no contiene adsorbato, por lo que la concentración en el fluido disminuye exponencialmente con la distancia hasta llegar a una concentración de prácticamente cero en el extremo final del lecho. Después de unos minutos el sólido que se encuentra próximo a la entrada del lecho se satura por lo que la zona de adsorción se desplaza a una distancia lejos de la entrada (Figura 2) [34]. El desplazamiento de la zona de adsorción ocurre a lo largo de toda la columna, hasta que la concentración del soluto en el efluente aumenta bruscamente hasta un valor apreciable por primera vez, alcanzando así el “punto de ruptura o quiebre”. Una vez llegado al punto de ruptura, la concentración se eleva rápidamente hasta el final de la zona de adsorción, que es donde el lecho pierde su efectividad [31].

Se debe tener en cuenta que en este tipo de operación, la solución entra y sale continuamente de la columna, así que el equilibrio completo nunca es alcanzado en ninguna etapa entre el soluto en la solución y la cantidad de adsorbato. Es por esto que el equilibrio tiene que ser continuamente establecido, a lo que se le denomina equilibrio dinámico [14].

La región donde ocurre la mayor parte del cambio de concentración es llamada zona de transferencia de materia y sus límites frecuentemente se toman como  $c/c_0=0,95$  a  $0,05$ . Al graficar la relación entre las concentraciones del efluente e influente y el tiempo, se obtiene la curva de ruptura que usualmente tiene forma de S [14], donde la pendiente es el resultado de tres factores: la relación de la isoterma de sorción, los efectos de la transferencia de masa a través del sorbente en la columna, y la influencia de la mezcla axial, la cual determina la desviación del comportamiento ideal de flujo tapón [37].

Por medio de las curvas de ruptura es posible describir el comportamiento en la columna de lecho fijo y así establecer características importantes para determinar la operación y respuesta dinámica de la adsorción. Para comprender aún más dicho comportamiento se hace uso de modelos matemáticos que posteriormente pueden ser aplicados para la optimización del diseño y proceso en una planta piloto o a escala industrial [38]. En la tabla 1 se muestran los modelos matemáticos generalmente usados en las operaciones de lecho fijo.

**Figura 2.** Proceso de adsorción en continuo por medio de lecho fijo [40].



**Tabla 1.** Modelos matemáticos para la descripción de curvas de ruptura.

Modelo	Ecuación	Descripción
Hall [40]	$t - t^* = \left(\frac{1}{\lambda K_s S_0}\right) \ln\left(\frac{x}{1-x}\right) + \left(\frac{1}{K_s S_0}\right) \ln\left(\frac{0,5}{x}\right)$ <p>Siendo,</p> $t^* = \frac{L}{V} \left[ 1 + \frac{(1-\varepsilon) q_0}{\varepsilon C_0} \right]$ $\lambda = 1 - \beta ; \beta = 1 - \frac{q_0}{q_m}$	<p>Define el tiempo estequiométrico (<math>t^*</math>) como el tiempo en el cual existe la curva de ruptura de la columna, correspondiendo al instante de tiempo al cual ocurre la saturación completa.</p> <p>En realidad las curvas de ruptura no son tan definidas pero si son simétricas, entonces el <math>t^*</math> corresponde con el tiempo en el que la concentración del efluente es exactamente la mitad de la concentración de la alimentación[40].</p>

Thomas[41]	$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{k_{Th}q_0x}{v} - k_{Th}C_0t\right)}$	Basado en la cinética de adsorción-desorción de Langmuir. Se asume que no hay dispersión axial [41], además de comportamiento de flujo tapón.
Adams-Bohart [36,42]	$\frac{C_t}{C_0} = \exp\left(k_{AB}C_0t - k_{AB}N_0\frac{Z}{F}\right)$	Asume que la tasa de adsorción es proporcional a la capacidad residual del adsorbente y a la concentración de las especies adsorbentes [36]. Es usado para la descripción de la parte inicial de la curva de ruptura [42].
Wolborska [43]	$\ln\frac{C}{C_0} = \frac{\beta_\alpha C_0}{N_0}t - \frac{\beta_\alpha Z}{U}$ $\beta_\alpha$ es el coeficiente cinético de transferencia de masa externo (min <sup>-1</sup> )	Describe la distribución de la concentración en un lecho, para el rango de baja concentración de la curva de ruptura [43].
Clark [36]	$\frac{C_t}{C_0} = \left(\frac{1}{1 + Ae^{-rt}}\right)^{1/(n-1)}$	Basado en el concepto de transferencia de masa en combinación con la isoterma de Freundlich [36].
BDST (Bed Depth Service Time) [44]	$t_r = \frac{N_0}{C_i v}Z - \frac{1}{K_\alpha C_i} \ln\left(\frac{C_i}{C} - 1\right)$ $N_0$ es la capacidad de sorción máxima del lecho, mg/L $V$ es la velocidad lineal $K_\alpha$ es la constante de velocidad, L/mg*min	Asume que la tasa de adsorción es controlada por la reacción en la superficie entre el adsorbato y la capacidad del adsorbente sin usar [35]. Predice la relación entre la altura de relleno, y el tiempo de ruptura, $t_r$ , para una columna de lecho fijo [44].
Yoon-Nelson [45]	$\frac{C_t}{C_0 - C_t} = \exp(k_{YN}t - \tau k_{YN})$	Este modelo asume que la velocidad con la que se disminuye la probabilidad de adsorción para cada molécula de adsorbato es proporcional a la probabilidad de adsorción del adsorbato y a la probabilidad de que no se adsorba sobre el adsorbente [45].

Los modelos anteriormente presentados, se han utilizado para ajustar diversos experimentos realizados en lecho fijo. Por ejemplo Bonilla y colaboradores [26] encontraron que el modelo de Thomas muestra un desempeño apropiado para las curvas de ruptura en la adsorción de  $Zn^{+2}$  a las condiciones de operación; en la adsorción de Cadmio, por medio de carbón activado obtenido a partir de lodos residuales, se observó un punto de ruptura a los 4 minutos, correspondientes a un volumen de 0,02 L de agua tratada, obteniendo el punto

de saturación a los 160 minutos con un volumen de 0,8 L [27]. En la adsorción de azul de metileno con polvo de hojas de árbol Fénix, la región inicial de la curva de ruptura fue descrita por el modelo de Adams-Bohart para todas las condiciones experimentales mientras que para la etapa transitoria de las curvas los modelos de Clark y Thomas las describían muy bien [36]. Para la adsorción de Rodamina B, usando carbón activado obtenido a partir de racimos de frutas vacías de aceite de palma, se encontró una capacidad máxima de adsorción de 69,86 mg/g, el modelo de Thomas tiene un buen ajuste en la descripción del proceso y de las curvas de ruptura [12].

## 2. METODOLOGÍA

En el siguiente esquema (Figura 3) se muestran las etapas a seguir en el desarrollo del presente trabajo de grado, las cuales posteriormente se explicarán con más detalle.

**Figura 3.** Metodología utilizada en el trabajo de grado.



### 2.1. PRELIMINARES

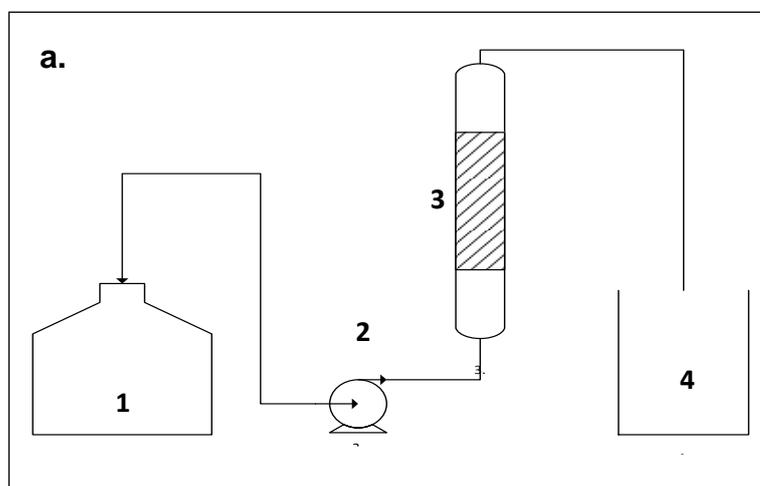
#### 2.1.1. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA EN CONTINUO

El montaje y puesta en marcha del sistema se realizó teniendo en cuenta el diseño de la torre de adsorción llevado a cabo en un trabajo de grado anterior y otros datos reportados en la literatura [7,12, 23, 37, 38]. El montaje experimental utilizado en los experimentos está conformado por un tanque de alimentación con capacidad de 4 L, una bomba peristáltica marca Masterflex-Cole Parmer (conformada por un motor, un cabezal SS ShortShaft y un tubing L/S 16 de 1,5 m de longitud); una columna de vidrio de 12 cm de altura con 2 cm de diámetro interno y un tanque receptor. Un envase con capacidad de 4 L se usó como tanque de alimentación, sellado con papel parafilm y cinta teflón para evitar evaporación de la solución, dejando solo una pequeña entrada para el tubing usado en la bomba peristáltica.

El lecho dentro de la columna vertical está compuesto por varias secciones: 1) en la parte más externa se colocaron esferas de vidrio con diámetro 0,3 cm (para asegurar un flujo uniforme); 2) luego lana de cuarzo (inferior: 0,5 g; superior: 1,5 g) para fijar el lecho de carbón el cual está ubicado en la parte central. Finalmente; una capa de lana de cuarzo (0,5 g) se fijó en el tope de la columna para evitar pérdidas de carbón.

El esquema del sistema de adsorción utilizado se muestra en la figura 4a, junto a la fotografía del sistema ya montado (figura 4b).

**Figura 4.** Sistema en continuo. a) Esquema del sistema en continuo señalando cada uno de sus componentes. 1) Tanque de almacenamiento; 2) Bomba peristáltica; 3) Columna de lecho fijo; 4) Tanque receptor. b) Montaje del sistema a escala laboratorio.





### 2.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Para el sistema en continuo de lecho fijo se usaron dos tipos de carbón activado. El primero se obtuvo, a partir de la pirólisis de llantas usadas a temperaturas entre 500 y 550°C, con tiempos de reacción en el rango de 100 a 140 minutos y activado químicamente con  $H_3PO_4$  como agente activante durante 40 minutos a 700°C y una relación de impregnación de 1,5 g AA/g precursor (CAL), obtenido de una investigación previa [20]. EL carbón comercial (CAC) fue provisto por la empresa FILTRA H<sub>2</sub>O LTDA (Bogotá, Colombia). El carbón comercial se tamizó para obtener un tamaño de partícula similar al del carbón de llantas (> 1 mm).

Ambos carbones activados CAL y CAC se caracterizaron de acuerdo a literatura [18, 19, 20]. Para el CAL y CAC se les realizó un análisis próximo mediante la balanza termogravimétrica ATG 2050 (TA Instruments) con el cual se pudo determinar el contenido de humedad, cenizas, carbón fijo y volátil, según la norma TAPPI Estándar T 15 . Para la determinación del área superficial se realizó el análisis BET mediante un analizador de adsorción de gases de alta velocidad ( Nova 1200) mediante el Método de Brauner, Emmett y Teller [50]. Para el CAL se tomaron los datos de área BET y demás de la caracterización realizada anteriormente [20]. En el caso del CAC se realizó el

análisis BET. La densidad aparente de los carbones se determinó midiendo la relación entre una masa de valor conocido en un volumen determinado [38].

## **2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **2.2.1. PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE FENOLY RODAMINA B.**

Se preparó una solución stock de Fenol de 1000 mg/L en un matraz aforado de 500mL a partir de Fenol (99% p/p, PANREAC), usando agua destilada como solvente.

Para la Rodamina B se preparó una solución stock de 1000 mg/L en un matraz aforado de 500mL a partir de Rodamina B ( $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$ ) (R-A CHEMICALS pureza del 99% p/p), usando agua destilada como solvente.

### **2.2.2. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Para realizar los experimentos se decidió utilizar un diseño experimental de un factor a la vez [46]. Para ello, se evaluaron las curvas de ruptura variando solamente un factor (altura del lecho, caudal, o concentración inicial de la solución) a dos niveles, mientras que los otros se mantienen constantes, con el fin de evaluar la influencia que tiene cada factor en la adsorción de Rodamina B y Fenol en los dos tipos de carbones CAL y CAC. Las condiciones para los experimentos se detallan en la Tabla 2. Los experimentos se realizaron por duplicado.

Al inicio de cada experimento, se inundó la columna con agua destilada con la finalidad de ajustar el caudal del sistema antes de hacer pasar por el mismo las soluciones de Rodamina B y Fenol. Después de ajustar el caudal y conociendo qué cantidad de agua había dentro del sistema se cambia el flujo de agua y se introducen las soluciones conteniendo el soluto. Una vez pasa el tiempo calculado para permitir la salida del agua, se toma la primera muestra dando así inicio al experimento. Se tomaron muestras a intervalos de tiempo considerados pertinentes para la realización de los experimentos. Todos los experimentos se realizaron por duplicado.

Para cada prueba se tomaron muestras de 7 mL de la solución a la salida del sistema. En la primera hora de experimentación, el muestreo se realizó a los 0, 2, 6, 10, 15, 30 y 60 min; una vez terminado este periodo se tomaron muestras a intervalos de una hora. Luego de transcurridas 6h de experimentación se tomaron muestras cada 2h. Los experimentos se finalizaron una vez las variaciones entre las mediciones no fueran significativas.

Tabla 2. Condiciones de operación del sistema de adsorción en modo continuo.

Altura del Lecho / Masa de Carbón	Caudal	Concentración inicial
18 mm (2 g carbón)	8 mL/min	20 ppm
9 mm (1 g carbón)	16 mL/min	50 pm

### 2.2.3. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE RODAMINA B Y FENOL

Las mediciones de concentración de Rodamina B y Fenol se realizaron mediante Espectrofotometría UV-Vis en un espectrofotómetro UV-VIS Spectroquant Pharo 300 Merck, a longitudes de onda de 556 nm y 273 nm respectivamente, utilizando una cubeta de cuarzo (1 cm camino de luz). En el caso de la rodamina B se realizaron diluciones (1:10) en las muestras utilizando agua destilada como solvente. Para ambos compuestos, se realizaron las curvas de calibración necesarias utilizando soluciones stock.

### 2.3. AJUSTE DEL MODELO

Los datos experimentales de adsorción se ajustaron al modelo de Hall[41] utilizando la herramienta Excel.

$$t - t^* = \left(\frac{1}{\lambda K_s}\right) \ln\left(\frac{x}{1-x}\right) + \left(\frac{1}{K_s}\right) \ln\left(\frac{0,5}{x}\right)$$

$$\lambda = 1 - \beta ; \beta = 1 - \frac{q_0}{q_m}$$

Los parámetros correspondientes fueron obtenidos sabiendo que el tiempo estequiométrico  $t^*$  (min) corresponde a [41]:

$$t^* = \frac{L}{V} \left[ 1 + \frac{(1 - \varepsilon) q_0}{\varepsilon C_0} \right]$$

Donde  $L$  corresponde a la longitud del lecho (cm),  $V$  es la velocidad axial en el lecho (cm/min),  $\varepsilon$  porosidad,  $q_0$  concentración máxima de adsorción (mmol/g) y  $C_0$  concentración de alimentación (mmol/L),  $x$  es igual a la relación  $C/C_0$ .

El parámetro  $K_s$  (coeficiente global de transferencia de masa) se calculó mediante ensayo y error ajustando el coeficiente de correlación ( $0 \leq R^2 \leq 1$ ), definido como la comparación entre el monto total de la desviación alrededor del tiempo promedio aritmético ( $\bar{t}$ ),  $SCT$ , con la porción de ésta que está explicada por el modelo de regresión  $SCR$  [47]:

$$R^2 = \frac{\text{Variación explicada } SCR}{\text{Variación total } SCT} = \frac{\sum(\hat{t}_i - \bar{t})^2}{\sum(t_i - \bar{t})^2}$$

Siendo  $\hat{t}_i$  el tiempo de adsorción predicho por el modelo,  $t_i$  el valor experimental del tiempo de adsorción, y  $\bar{t}$  representa el promedio aritmético del tiempo de adsorción de los valores experimentales.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En la tabla 3, se reportan las características más importantes que se obtuvieron tanto para el carbón obtenido a partir de pirólisis de llantas (CAL), como para el carbón comercial (CAC).

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

Parámetro	CAL	CAC
Activación	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Vapor de alta temperatura
(%p/p) Humedad	13,20	8,56
(%p/p) Cenizas	33,47	0,03
(%p/p) Carbono fijo	1,26	21,14
(%p/p) Volátiles	52,07	70,27
Área superficial (m <sup>2</sup> /g)	53,2	864,36
Volumen de microporo (m <sup>3</sup> /g)	0,08	0,004
Volumen de macroporo (m <sup>3</sup> /g)	0,65	1,85

Las diferencias en la composición de ambos carbones están basadas tanto en la materia prima de la que provienen como en el proceso utilizado para su obtención. El CAL tiene un alto contenido en cenizas (33,47%) comparado con el CAC (0,03%), debido principalmente a los residuos inorgánicos provenientes de los aditivos que se le agregan al caucho para su uso en llanta, así como las sales que quedan luego del proceso de activación. El contenido en carbono fijo, es mucho menor para CAL (1,26%), comparado con CAC (21,14%), debido a que en el proceso de pirólisis se pierde material volátil. Para el parámetro del área superficial el CAC presenta un área aproximadamente 16 veces mayor frente al CAL, lo cual es característico de la activación por medio de vapor de alta temperatura en donde se producen carbones con una extensa red de poros y un área superficial extremadamente alta [49].

En el caso del volumen de microporo el valor para el CAL es aproximadamente 19 veces mayor en comparación al CAC, este parámetro determina en gran medida la capacidad de adsorción en los carbones activados siendo proporcionales a la capacidad de adsorción [24].

### 3.2.ADSORCIÓN EN MODO CONTINUO DE FENOL

El modelamiento de las curvas de ruptura tanto del fenol como de la rodamina se realizó utilizando el modelo de Hall. Para ello se utilizaron las constantes de la isoterma de Langmuir calculadas en un trabajo de grado anterior, [19] y presentadas en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Parámetros de la isoterma de Langmuir para la adsorción de fenol en modo batch sobre el carbón activado correspondiente.

Adsorbente	Adsorbato	Parámetros de la isoterma de Langmuir		
		$K\alpha$ (L mg <sup>-1</sup> )	Qm (mg/g)	R <sup>2</sup>
CAC	Fenol	0,0416	119,9792	0,9639
CAL	Fenol	0,0057	23,9677	0,9459

#### 3.2.1. ADSORCIÓN DE FENOL: INFLUENCIA DE LA ALTURA DEL LECHO

Las curvas de ruptura muestran el comportamiento del lecho fijo de carbón activado, de acuerdo a las condiciones de operación. Debido a que en el sistema continuamente entra y sale solución, el equilibrio entre el soluto en la solución y la cantidad de adsorbente nunca se alcanza completamente en ninguna zona; por ello el equilibrio en la columna es determinado como un equilibrio dinámico.

La influencia de la altura del lecho sobre las curvas de ruptura para la adsorción de fenol se presentan en las Figuras 5a y 5 b (para una altura de 18 mm y 9 mm, respectivamente). Se observa que un aumento en la altura del lecho aumenta la capacidad de adsorción de fenol sobre los carbones, siendo este comportamiento similar al observado en la adsorción de nitrofenol sobre carbón activado granular [52]. Es relevante mencionar que el Ks hallado en el

modelo de Hall se comporta de manera análoga al coeficiente de transferencia de masa volumétrico ( $K_{La}$ ) hallado en la adsorción de nitrofenol, es decir, estos coeficientes aumentan al disminuir la altura del lecho (Tabla 5).

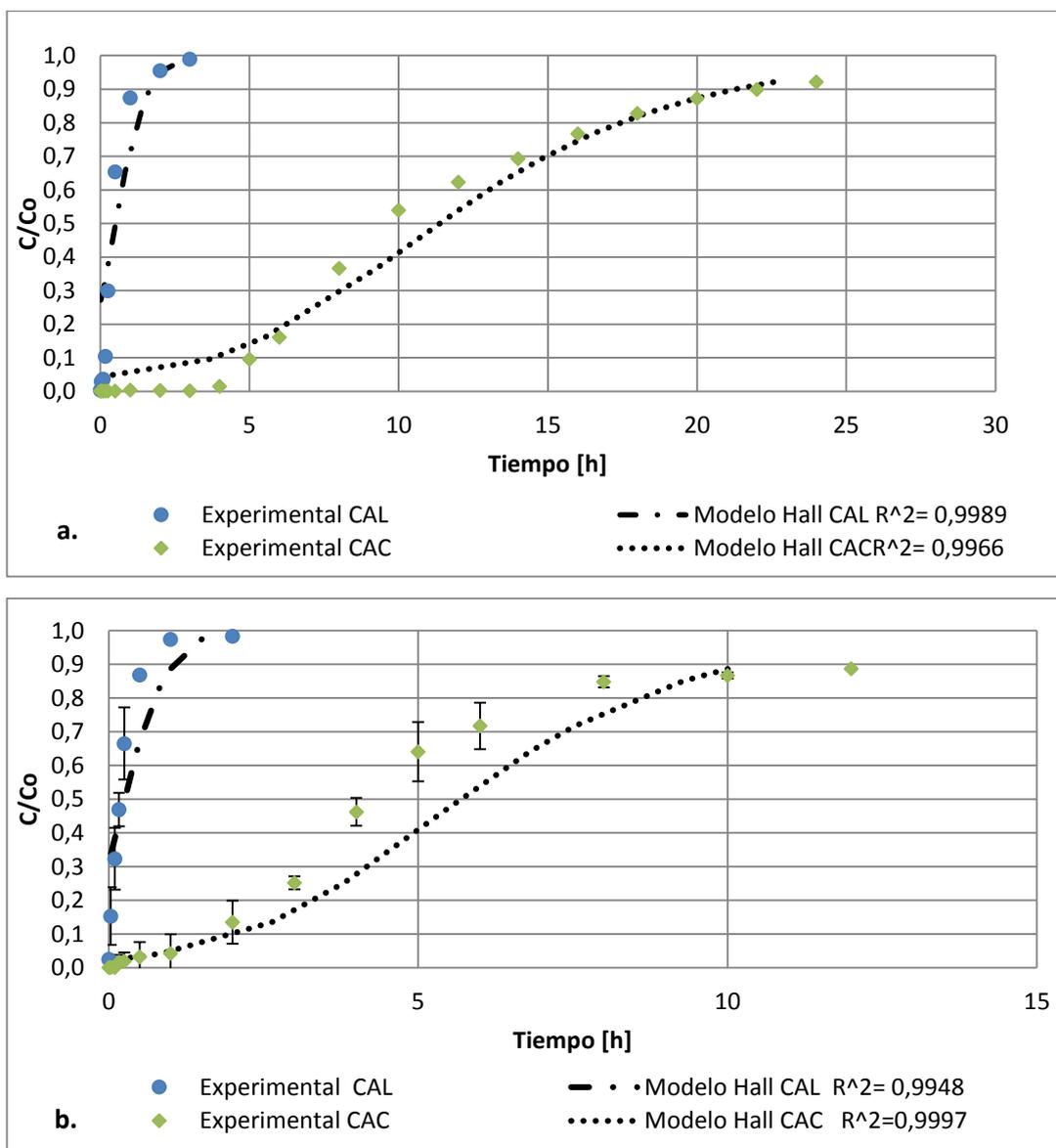
Para una altura de lecho de 18 mm, se puede observar que el punto de ruptura ( $C/C_0 = 0,05$ ) para el CAL se presenta aproximadamente a los 7 min, mientras que para el CAC fue de 5 horas aproximadamente. De la misma manera se observa que el punto de agotamiento de la columna ( $C/C_0 = 0,95$ ) aparece primero para CAL (2 h) que para CAC (24 h, aproximadamente). Aunque el tiempo de agotamiento es mucho mayor para el CAC, la curva de ruptura no es favorable ya que la pendiente es plana y en el tiempo de estudio de la adsorción no alcanza la saturación total [37].

Por otro lado, para una altura de lecho de 9 mm, el punto de ruptura aparece a los 2 min para el CAL, mientras que para CAC demora 1 h aproximadamente. De la misma manera la columna de CAL se agota más rápido (1 h, aprox.) que la columna de CAC (> 12 h). Aunque se evidencia que el CAC tiene mayor afinidad con el fenol que el CAL, su curva sigue siendo desfavorable ya que después de 12 h no alcanzó la saturación, prácticamente sin observarse cambios significativos después de las 8 horas.

En las figuras también se puede apreciar el ajuste al modelo usado (Modelo de Hall) para describir el comportamiento del proceso para los dos carbones. En ambos casos, se calcularon los parámetros característicos para las condiciones de operación,  $t^*$  (tiempo estequiométrico, h), el cual predice el tiempo al cual la relación  $C/C_0 = 0,5$ , y  $K_s$  (coeficiente global de transferencia de masa,  $h^{-1}$ ), respectivamente. El  $t^*$  para las alturas de 18 y 9 mm del CAL presenta valores más altos (0,52 y 0,26 h, respectivamente) que los obtenidos en la experimentación (0,33 y 0,17 h, respectivamente). De manera similar para el CAC los valores de  $t^*$  son mayores que lo observado en la experimentación, sin embargo los valores de  $t^*$  y del tiempo obtenido en los experimentos no presentan una diferencia relevante. Se cuantificó la proximidad de los datos experimentales y del modelo por medio del uso del coeficiente de ajuste  $R^2$ .

Los parámetros del modelo para cada una de las curvas mostradas se presentan en la Tabla 5.

**Figura 5.** Curvas de ruptura para la adsorción de Fenol sobre CAL y CAC variando la altura del lecho. a) H=18 mm; b) H=9 mm; ( $C_0 = 20$  ppm;  $Q = 8$  mL/min;  $T = \pm 24^\circ\text{C}$ ).



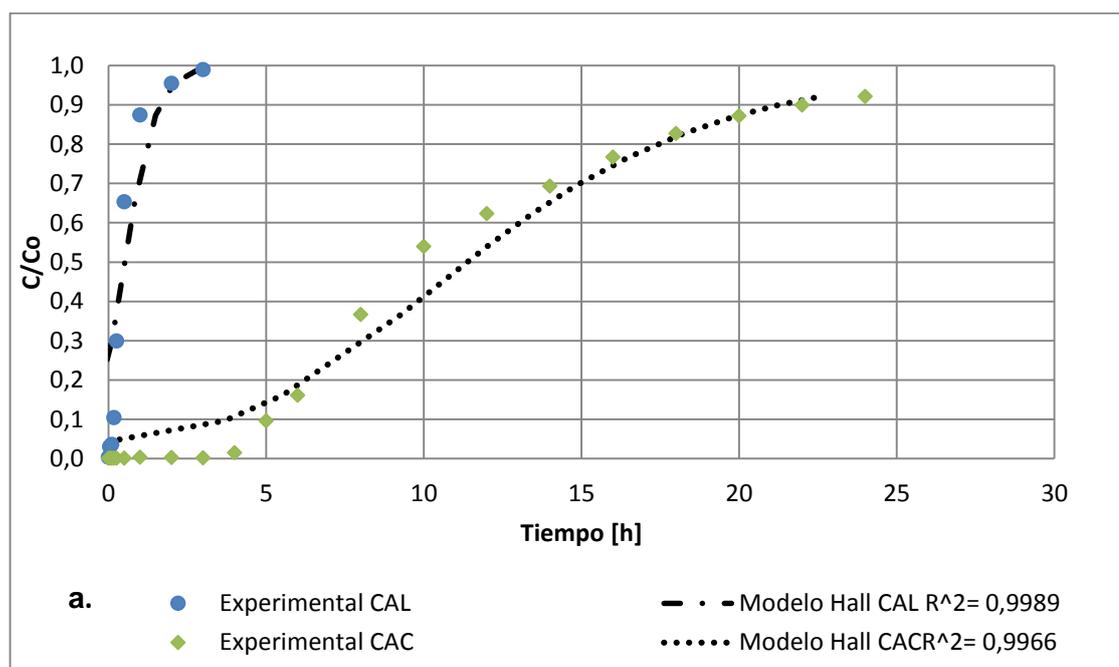
### 3.2.2. ADSORCIÓN FENOL: INFLUENCIA DEL CAUDAL

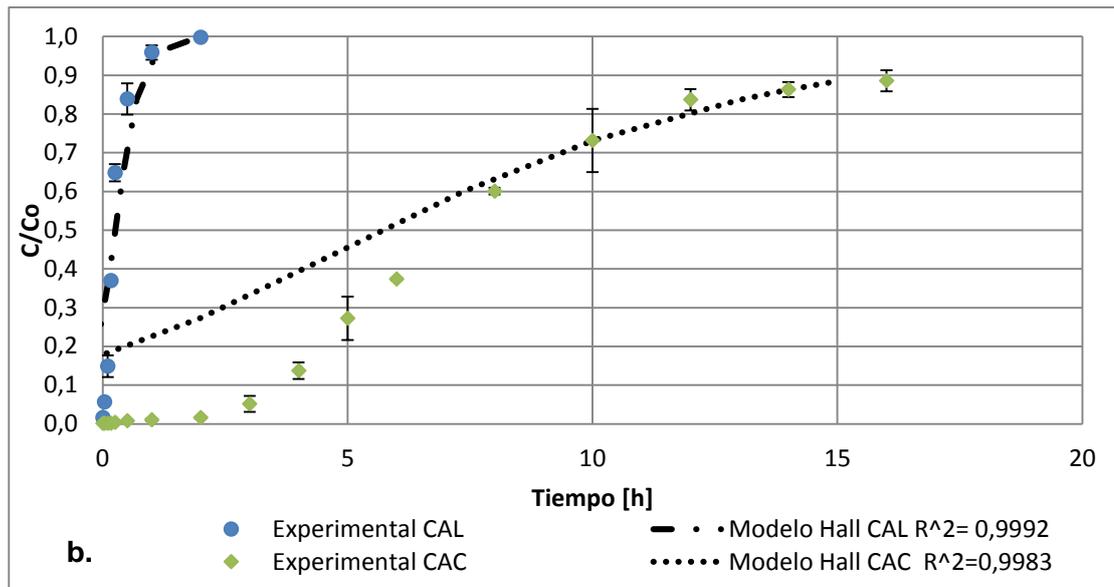
La Figura 6 muestra el efecto del caudal en las curvas de ruptura para la adsorción de fenol sobre el CAL y CAC. En la figura 6a se muestra el comportamiento del proceso usando un caudal de 8 mL/min y en la figura 6b la adsorción se realiza usando un caudal de 16 mL/min. Se evidencia que un

aumento en el caudal ( $Q = 16 \text{ mL/min}$ ) hace que el punto de ruptura para los dos carbones ocurra más rápido ( $CAL = 2 \text{ min}$ ;  $CAC = 3 \text{ h}$  aprox.) en comparación al usar un caudal de  $8 \text{ mL/min}$  ( $CAL = 1 \text{ h}$ ;  $CAC > 16 \text{ h}$ ). De igual manera, el tiempo de agotamiento ocurre antes para el caudal de  $16 \text{ mL/min}$  en los dos carbones ( $CAL = 3 \text{ h}$ ;  $CAC > 16 \text{ h}$ ), a diferencia del caudal de  $8 \text{ mL/min}$  ( $CAL = 4,5 \text{ h}$ ;  $CAC > 24 \text{ h}$ ); es decir que un aumento en el caudal disminuye el tiempo del punto de ruptura y del punto de agotamiento tanto para el CAL como para el CAC, este tipo de comportamiento es similar a lo reportado en la literatura[14, 26]. Cabe aclarar que aún con el aumento de caudal la curva de ruptura para el CAC sigue teniendo un comportamiento desfavorable.

En las gráficas también se presentan el ajuste del modelo y su comparación con los datos experimentales; los parámetros del modelo para cada uno de los comportamientos se presentan en la Tabla 4. Se observa que, para el CAL, el  $t^*$  es 1,53 veces mayor ( $0,260 \text{ h}$ ) que lo observado experimentalmente ( $0,17 \text{ h}$ ); mientras que en el caso del CAC el  $t^*$  es menor ( $5,68 \text{ h}$ ) que el tiempo experimental ( $7 \text{ h}$ , aproximadamente).

**Figura 6.** Curvas de ruptura para la adsorción de Fenol sobre CAL y CAC variando el caudal a)  $Q = 16 \text{ mL/min}$ ; b)  $Q = 8 \text{ mL/min}$ ; ( $C_0 = 20 \text{ ppm}$ ;  $H = 18 \text{ mm}$   $T = \pm 24^\circ\text{C}$ ).



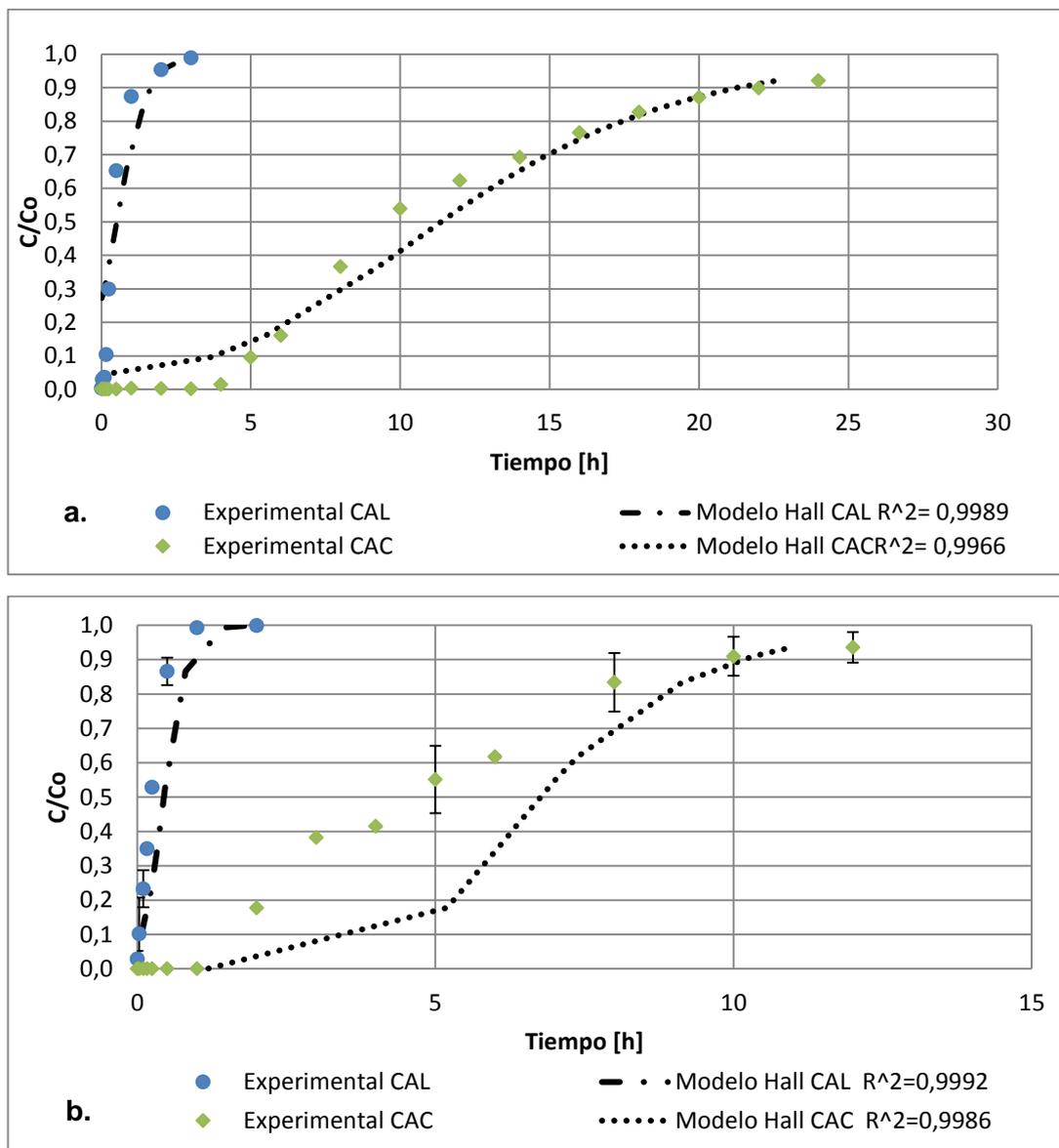


### 3.2.3. ADSORCIÓN DE FENOL: INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE LA ALIMENTACIÓN

El aumento en la concentración de alimentación (de 20 mg/L a 50 mg/L) afecta evidentemente la adsorción en el lecho fijo, tanto para el CAL como para el CAC (Figura 7). Como puede observarse, para el CAL el punto de ruptura se presenta 1 min después de iniciado el experimento, mientras que para el CAC se da a los 90 min. De la misma manera, el lecho de CAL se satura totalmente antes de 1 h, mientras que en la columna con CAC la saturación aparece después de 12 h de funcionamiento. De todas maneras, este comportamiento en la curva de ruptura para CAC sigue siendo desfavorable.

Con los datos obtenidos de todos los experimentos realizados a diferentes condiciones de operación, se puede apreciar que el CAC tiene una mayor afinidad por el fenol, lo cual se puede ratificar por medio de la capacidad de adsorción obtenida de la isoterma de Langmuir  $q_e = 124,66$  mg de fenol/g de CAC; a diferencia de la capacidad del CAL ( $q_e = 23,97$  mg de fenol/g de CAL) [18]. Además, el área BET también juega un rol importante en la adsorción partiendo del hecho que el CAC posee un área superficial 16,25 veces mayor que el CAL.

**Figura 7.** Curvas de ruptura para la adsorción de Fenol sobre CAL y CAC variandola concentración inicial. a)  $C_0=20$  ppm b)  $C_0=50$  ppm ( $H=18$  mm;  $Q=8$  mL/min;  $T=\pm 24^\circ\text{C}$ ).



El modelo de Hall se ajusta en promedio de manera satisfactoria para los dos tipos de carbones ( $R^2 > 0,98$ ). Sin embargo, las curvas de ruptura evidencian desviaciones del modelo, tendencia acorde a la condición de las curvas de ruptura desfavorables para CAC, lo cual hace que parte del lecho quede subutilizado. Dado que el Modelo de Hall fue desarrollado para curvas de ruptura perfectamente simétricas (en forma de S), es de esperar que en este

caso el modelo no ajuste correctamente las curvas obtenidas. Los parámetros obtenidos para el modelo de Hall se presentan en la tabla 5. De los parámetros obtenidos, puede observarse que el coeficiente de transferencia de masa es mucho mayor para CAL que para CAC ( $K_s < 1$ ), confirmando el comportamiento visto en los cuales se evidencia una saturación en menor tiempo para los lechos fijos de CAL.

Factor			CAL			CAC		
H [mm]	Q [mL/min]	Co [ppm]	t*[h]	Ks [h <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>	t*[h]	Ks [h <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>
18	8,00	20	0,520	18,780	0,9989	11,360	0,4280	0,9966
9	8,00	20	0,260	28,100	0,9948	5,680	0,9130	0,9970
18	16,00	20	0,260	35,700	0,9992	5,680	0,4210	0,9983
18	8,00	50	0,450	21,830	0,9992	6,760	0,7900	0,9989

**Tabla 5.** Parámetros de modelo de Hall para la adsorción de Fenol.

### 3.3. ADSORCIÓN EN MODO CONTINUO DE RODAMINA B

El modelamiento de las curvas de ruptura de la rodamina B se realizó utilizando el modelo de Hall. Para ello se utilizaron las constantes de la isoterma de Langmuir calculadas en un trabajo de grado anterior, [19] y presentadas en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros de la isoterma de Langmuir para la adsorción de Rodamina B en modo batch sobre el carbón activado correspondiente.

Adsorbente	Adsorbato	Parámetros de la isoterma de Langmuir		
		K $\alpha$ (L mg <sup>-1</sup> )	Qm (mg/g)	R <sup>2</sup>
CAC	Rh B	24,6496	41,7729	0,9723
CAL	Rh B	0,134	36,1764	0,927

#### 3.3.1. ADSORCIÓN DE RODAMINA B: INFLUENCIA DE LA ALTURA

La figura 8 muestra las curvas de ruptura obtenidas para la adsorción de Rodamina B (RhB) en lecho fijo usando los dos tipos de carbones, CAL y CAC, para dos diferentes alturas de lecho. En la figura 8a se muestran las curvas de ruptura para una altura de lecho de 18 mm y el ajuste del modelo de Hall. Para

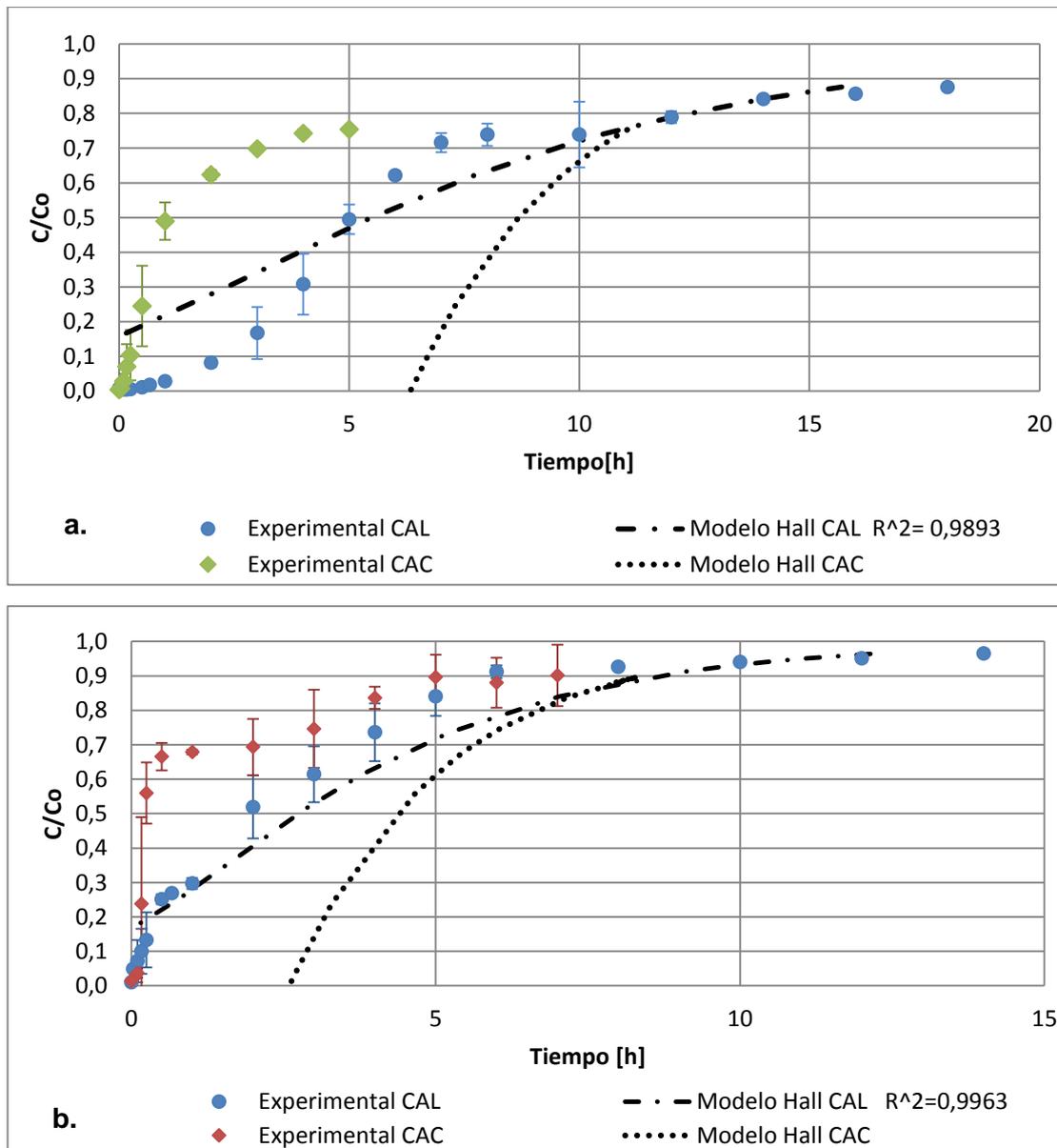
la adsorción de RhB se encuentra que el CAL presenta mayor tiempo de funcionamiento en la columna a diferencia del CAC, lo cual se evidencia con los puntos de ruptura (1,5 h y 7 min, respectivamente). Aunque los dos carbones poseen una alta capacidad de adsorción [18], las curvas para los carbones son desfavorables debido a que su agotamiento es lento, por lo cual no se vio la necesidad de llevar el experimento hasta la saturación total.

Por medio del ajuste de los datos experimentales al modelo de Hall se pudieron encontrar los parámetros característicos del modelo ( $t^*$  y  $K_s$ ). Para el caso del CAL se encontró que el  $t^*$  tiene un valor similar al tiempo experimental (5,49 h y 5 h, respectivamente).

El modelo de Hall presentó un ajuste apropiado ( $R^2= 0,9893$ ) sin embargo no se pudo realizar un ajuste que pudiera describir el comportamiento para el CAC, esto se puede deber a los parámetros de la isoterma (isoterma de Langmuir) que caracteriza la adsorción de rodamina B con CAC, los cuales demuestran que hay una gran afinidad entre este adsorbente y el adsorbato; tal incongruencia entre los datos experimentales y el ajuste al modelo se pueden atribuir a las condiciones de operación del sistema, principalmente a los caudales usados (8 mL/min y 16 mL/min ) que probablemente resultan altos y no permiten que la solución tenga el tiempo de contacto suficiente para que se realice la difusión de la rodamina B hacia los poros del carbón.

Además es relevante mencionar que la estructura del carbón comercial también influye en la difusión pues se corroboró su poca eficacia para la adsorción de rodamina B usando el carbón comercial en su presentación original en forma de pellets (Anexo H). Esta diferencia entre los datos experimentales y el modelo de Hall se evidencia en todos los experimentos realizados con CAC.

**Figura 8.** Curvas de ruptura para la adsorción de Rodamina B sobre CAL y CAC variando la altura del lecho a) H=18 mm b) H =9 mm; ( $C_0= 20$  ppm;  $Q= 8$  mL/min;  $T=\pm 24^\circ\text{C}$ ).



La figura 8b presenta el comportamiento del lecho para una altura de 8mm. Tanto para el CAL y CAC el punto de ruptura ocurre en los primeros minutos de iniciado el experimento (CAL= 2 min; CAC= 6 min, aprox.); el agotamiento ocurre más rápido en el CAC (7h, aprox.) que en el CAL(12 h). Al disminuir la altura del lecho la saturación ocurre antes debido a que se disminuye la

capacidad de adsorción del lecho, este comportamiento concuerda con lo reportado en la literatura [34, 51].

Por medio de los datos experimentales para el CAL y el ajuste al modelo de Hall se pudo hallar el  $t^*$ , el cual es cercano (2,74 h) al observado en la experimentación (2 h), por otro lado el modelo presenta un coeficiente  $R^2 = 0,9963$ .

En el caso del CAC se presentó la misma incongruencia mencionada y justificada anteriormente. Debido a su comportamiento las dos curvas de rupturas son desfavorables.

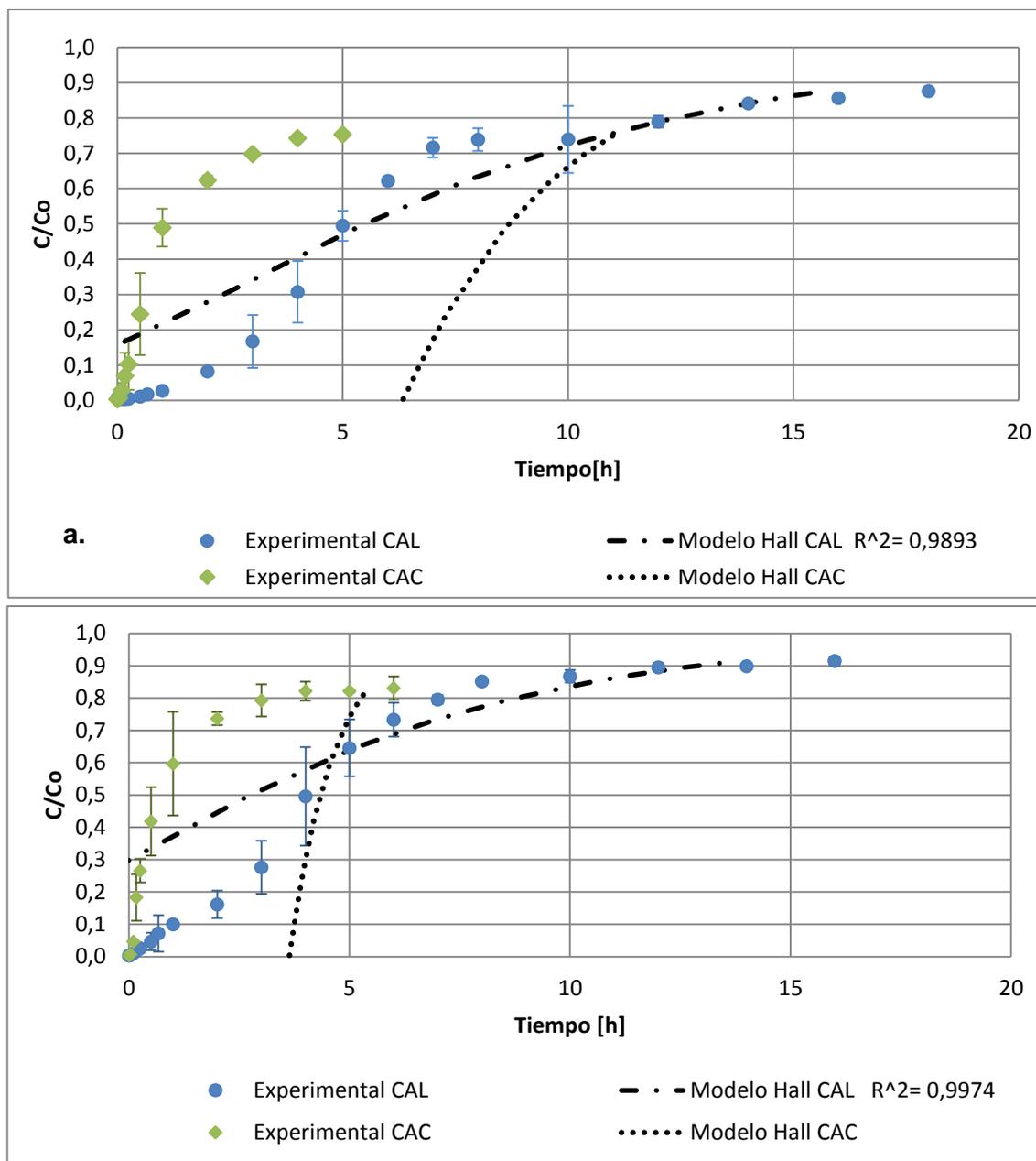
### **3.3.2. ADSORCIÓN DE RODAMINA B: INFLUENCIA DEL CAUDAL**

El comportamiento de la curva de ruptura para la adsorción de rodamina B sobre CAL al aumentar el caudal a 16 mL/min (Figura 9b) es similar al comportamiento observado con un caudal de 8 mL/min (Figura 9a), sin embargo presenta un aumento en la relación  $C/C_0$  en las primeras 6 horas y que posteriormente se vuelve menor con el pasar de las horas, llegando a un estado casi estable a las 8h.

El punto de ruptura para el CAL ocurre a los 30 min de iniciado el experimento, mientras que para el CAC este punto aparece a los 6 min, a la mitad del tiempo para los experimentos realizados con el caudal de 8 mL/min. El proceso resulta ser análogo también para el CAC por lo cual dentro del tiempo de estudio no alcanzó la saturación total del lecho.

Aunque el ajuste de las curvas de ruptura con CAL al modelo de Hall presenta un  $R^2$  mayor a 0,98, la curva del modelo no se ajusta a tales valores, esto se debe a que el modelo se ajusta principalmente a valores de  $C/C_0$  próximos y mayores a 0,6. Este comportamiento sucede para todas las curvas de ruptura de adsorción de rodamina B sobre CAL a las diferentes condiciones de operación.

**Figura 9.** Curvas de ruptura para la adsorción de Rodamina B sobre CAL y CAC variando el caudal. a)  $Q=8\text{ml/min}$  b)  $Q=16\text{ ml/min}$ ; ( $C_0= 20\text{ ppm}$ ;  $H = 18\text{ mm}$ ;  $T=\pm 24^\circ\text{C}$ ).



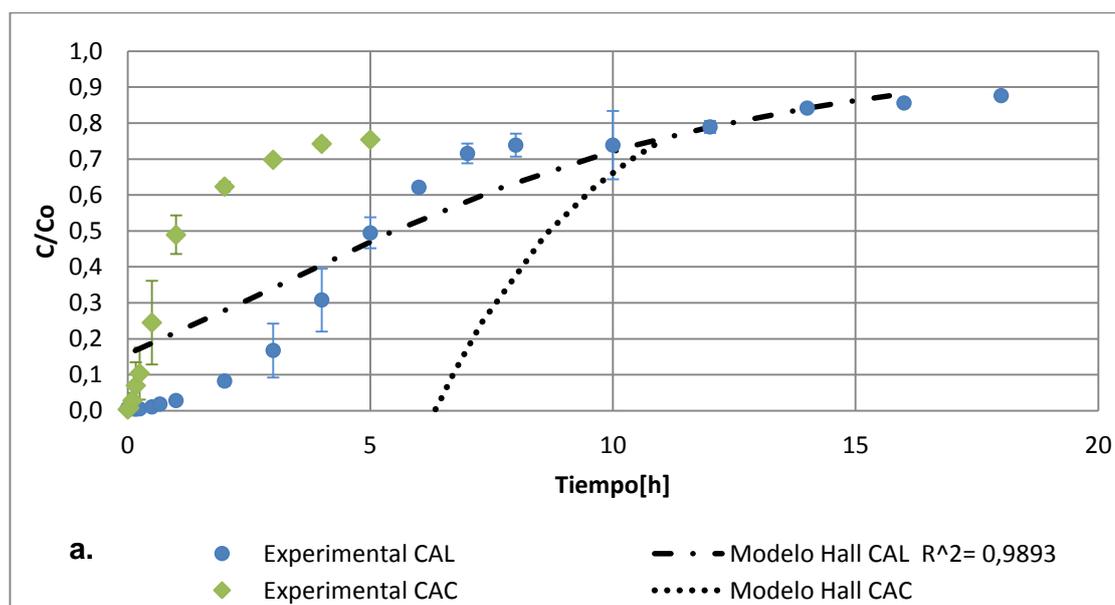
### 3.3.3. ADSORCIÓN DE RODAMINA B: INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE ALIMENTACIÓN

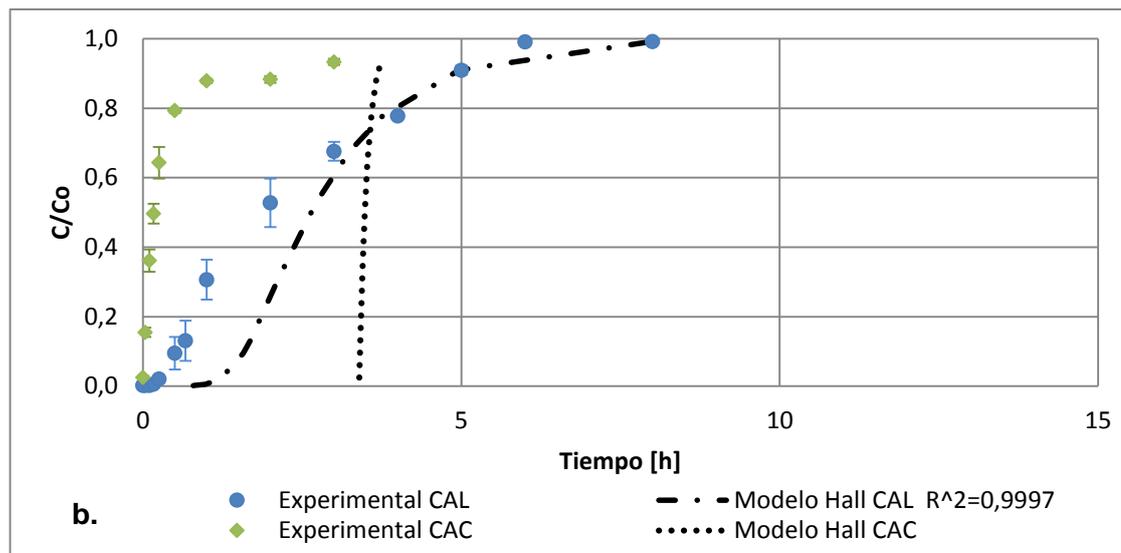
El aumento en la concentración en la alimentación (Figura10) varía de manera notable las curvas de ruptura de los carbones CAL y CAC debido a que los dos

tipos de lechos alcanzan la saturación, generando curvas de ruptura favorables que se ajustan mejor al modelo de Hall. Sin embargo se sigue manteniendo la misma tendencia que se ha mantenido en los experimentos, es decir, el CAC es el primero en alcanzar el punto de ruptura (0 min) y el primero en agotarse (3 h, aprox.) a diferencia del CAL, el cual tiene su punto de ruptura a los 23 min y su agotamiento aparece entre la 5 h y la 6 h. Se observa que un incremento en la concentración de alimentación provoca un decrecimiento del tiempo del punto de ruptura, esto probablemente sucede debido a que a altas concentraciones de alimentación genera un alto coeficiente de transferencia de masa [12], lo cual se corrobora por medio del  $K_s$  ( $0,88 \text{ h}^{-1}$ ) encontrado por medio del modelo de Hall.

El modelo de Hall se ajusta con los datos experimentales para el CAL ( $R^2=0,9997$ ), principalmente después de alcanzar una relación  $C/C_0=0,78$ . Aunque en el modelo de Hall para el ajuste con los datos del CAC también se presenta una variación por la influencia de la concentración, éste no presenta un ajuste apropiado que describa correctamente el proceso realizado.

**Figura 10.** Curvas de ruptura para la adsorción de Rodamina B sobre CAL y CAC variando la concentración inicial. a)  $C_0= 20 \text{ ppm}$  b)  $C_0= 50 \text{ ppm}$ ; ( $H = 18 \text{ mm}$ ;  $Q= 8 \text{ ml/min}$ ;  $T=\pm 24^\circ\text{C}$ ).





En la Tabla 7 se presentan los parámetros del modelo de Hall y su ajuste. Los valores del tiempo estequiométrico,  $t^*$ , resultan ser cercanos a los tiempos observados en los experimentos en el que la relación es  $C/Co = 0,5$ . Por otro lado el coeficiente global de transferencia de masa corrobora lo que se evidenció en las curvas de ruptura de CAL, es decir, para las condiciones donde el proceso dura 18 h el coeficiente es mucho menor que en el resto de experimentos y de la misma manera se encuentra un  $K_s$  de 0,882 para el proceso en el que la curva de ruptura duró sólo 8h.

**Tabla 7.** Parámetros de modelo de Hall para la adsorción de Rodamina B.

Factor			CAL		
H [mm]	Q [mL/min]	Co [ppm]	$t^*$	$K_s$	$R^2$
18	8,00	20	5,4900	0,2080	0,9893
9	8,00	20	2,7400	0,4110	0,9963
18	16,00	20	2,7400	0,2390	0,9974
18	8,00	50	2,6300	0,8820	0,9997

### 3.4. COMPARACIÓN CON OTROS ADSORBENTES

La tabla 8 muestra los puntos de ruptura y de agotamiento en lechos fijos para diferentes carbones activados a partir de diversos precursores. Para la adsorción de fenol se encuentra que el CAC es el que tiene un comportamiento más adecuado en el proceso tanto para el tiempo de ruptura (270 min) como para el punto de agotamiento (1440 min). En general, los carbones activados

físicamente presentan una mejor capacidad de adsorción relacionada con el área BET de estos carbones la cual tiene valores por encima de los  $900\text{m}^2/\text{g}$  [2,48].

Para el caso de la adsorción con Rodamina es relevante mencionar que aunque el punto de ruptura se presenta primero (23 min) para el CAL en comparación del racimo del fruto de palma africana (120 min), el tiempo de funcionamiento de la columna hecha de CAL es mayor, teniendo en cuenta que la longitud del lecho con carbón de palma africana es mayor que la utilizada en los experimentos con CAL, con más del doble (4,4 g) [12] de la masa usada para el lecho de CAL (2 g).

**Tabla 8.** Comparación de puntos de ruptura y agotamiento para la adsorción de Fenol y Rodamina B en modo continuo.

Precursor	Adsorbato	Condiciones de operación			Punto de ruptura [min]	Punto de agotamiento [min]	Fuente
		H [cm]	Q[ml/min]	Co[mg/L]			
Carbón de llantas CAL	Fenol	1,8	8	20	7, aprox	120	Este estudio
Bagazo de caña de azúcar	Fenol	16	33,3	20	15	>200	[7]
Semilla de Dátil	Fenol	20	43,8	50	20	400	[48]
Cascara de la palma de aceite	Fenol	5	1	191	120	3600, aprox	[2]
Carbón comercial CAC	Fenol	1,7	8	20	270	1440	Este estudio
Carbón comercial CAC	Rh B	1,7	8	20	0	300, aprox	Este estudio
Carbón de llantas CAL	Rh B	1,8	8	50	23	300-360	Este estudio
Carbón de llantas CAL	Rh B	1,8	8	20	90	1080, aprox	Este estudio
Racimo del fruto de palma africana	Rh B	10	15	50	120	200	[12]

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de un carbón activado obtenido a partir de llantas y un carbón comercial en un sistema de adsorción en modo continuo a escala laboratorio. Para la adsorción de fenol es el carbón comercial, CAC, quien presenta mejor comportamiento en el proceso, mostrando de esta manera su mayor afinidad por este compuesto orgánico. Por otro lado el modelo de Hall describe de forma adecuada las curvas de ruptura de estos dos tipos de carbones bajo todas las condiciones de operación que se usaron, aunque las curvas generadas para la adsorción de fenol con CAC son de tipo desfavorable.

Para la adsorción de Rodamina B, en cambio, fue el carbón de llantas, CAL, el que presenta una mejor afinidad en el proceso y mayor tiempo de agotamiento de la columna. El uso del modelo de Hall describe de manera relativamente apropiada las curvas de ruptura para el CAL para las relaciones de C/Co iguales y mayores a 0,6. Por el contrario, el comportamiento del CAC no se pudo adecuar al modelo de Hall, lo cual es atribuido a las condiciones de operación tales como el caudal usado el cual no permite un tiempo de contacto suficiente para que suceda la difusión desde la película líquida hasta los poros del carbón, relacionado con la cinética de adsorción de fenol sobre CAC de pseudo primer-orden que infiere que la adsorción se debe a que las moléculas de adsorbato ocupan un sitio libre dentro de los poros del carbón.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GIRALDO Liliana, MORENO Juan Carlos. Study of adsorption of phenol on activated carbons obtained from eggshells. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 106, 2014. Pág. 41–47.
- [2] CHONG Aik, JIA Qipeng. Adsorption of phenol by oil–palm-shell activated carbons in a fixed bed. *Chemical Engineering Journal*, 150, 2009. Pág. 455 – 461.
- [3] GRABOWSKA E. Lorenc, GRYGLEWICZ G., DIEZ M.A. Kinetics and equilibrium study of phenol adsorption on nitrogen-enriched activated carbons, *Fuel*, 114, 2013. Pág. 235 – 243.
- [4] LÜ Guocheng, HAO Jiao, LIU Liu, MA Hongwen, FANG Qinfang, WU Limei, WEI Mingquan, ZHANG Yihe. The Adsorption of Phenol by Lignite Activated Carbon, *Separation Science and Engineering*, 19, 2011. Pág. 380– 385.
- [5] KILIC Murat, VAROLEsin A., PÜTÜN Ayse E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 189, 2011. Pág. 397– 403.
- [6] HAMMACHE F. Oughlis, MAOUCHEN. Hamaidi, BENISSADF. Aissani, BACHA S. Bourouina. Central Composite Design for the Modeling of the Phenol Adsorption Process in a Fixed-Bed Reactor. *Journal Chemical & Engineering Data*, 55, 2010. Pág. 2489 – 2494.
- [7] KARUNARATHNEAH.D.S.S., AMARASINGHEA B.M.W.P.K. Fixed bed adsorption column studies for the removal of aqueous phenol from activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Energy Procedia*, 34, 2013. Pág. 83 – 90.

- [8] ABDELWAHAB O., AMIN N.K. Adsorption of phenol from aqueous solutions by *Luffa cylindrica* fibers: Kinetics, isotherm and thermodynamic studies. Egyptian Journal of Aquatic Research, 39, 2013. Pág. 215–223.
- [9] MENDIZÁBAL Eduardo, RÍOS Nely, CARRANZA Roxana de Jesús, GARCÍA Raúl, BLANCO Alicia, GARCÍA Beatriz. Eliminación de colorantes de disoluciones acuosas utilizando sulfato de quitosano. Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol 14. 2013. Pág. 256 – 263.
- [10] MARTÍNEZ Octavio, HERNANDEZ César, GÓMEZ Raúl. Remoción de colorantes de efluentes de la industria textil. México D.F., 2010. Tesis (Licenciado en Ingeniería Química). Universidad Autónoma Metropolitana. Licenciatura en Ingeniería Química.
- [11] GALICIA Gamaliel. Remoción de un colorante de los efluentes de la industria textil mediante adsorción en una zeolita natural. México D.F. 2011. Tesis (Maestro en Ciencias (Ingeniería Química)). Universidad Autónoma Metropolitana.
- [12] AUTA Manase. Fixed bed adsorption studies of rhodamine B dye using oil palm empty fruits bunch activated carbon. Journal of Engineering Research and Studies, Vol 3. 2012. Pág. 3 – 6.
- [13] SALMAN Iqbal, AHMED Saadiyah, ABED Khulood. Adsorption study of rhodamine B dye on iraqi bentonite and modified bentonite by nanocompounds  $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $Al_2O_3$  and sodium dodecyl sulfate. American Journal of Environmental Science 9, 2013. Pág. 269 – 279.
- [14] MEIKAP B.C. DWIVEDI C.P., SAHU J.N., MOHANTY C.R., MOHAN B.R., Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb (II) removal. Journal of Hazardous Materials 156, 2008. Pág 596 – 603.
- [15] RANGEL Jose, NIETO Cesar. Production of activated carbon from organic by-products from the alcoholic beverage industry: Surface area and hardness optimization by using the response surface methodology. Industrial Crops and Products, 34, 2011. Pág. 1528 – 1537.

[16] FERNANDEZ R., PRIMAVERA O, COLPAS F., MEZA E. Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 35, 2011. Pág. 387–396.

[17] EKLUND Peter, GATZ Jennifer, ALLEN Jan. Applications for activated carbons from used tires: butane working capacity. *Carbon*, 37, 1999. Pág. 1485 – 1489.

[18] CARREÑO Jhonattan J., SCHOTBORGH Christian J. Evaluación de carbón activado obtenido a partir de llantas usadas para la adsorción en modo batch de Rodamina b, fenol y metales pesados. Bucaramanga, 2014. Tesis (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

[19] RAMÍREZ Jenny P., FLÓREZ VANESSA A. Activación química de carbón pirolítico obtenido a partir de caucho de llantas usadas. Bucaramanga, 2013. Tesis (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

[20] CANTILLO Melina, GIRALDO Liliana, MORENO Carlos. Preparación de carbones activados a partir de residuos de llantas. Activación física y química. *Revista Colombiana de Química*, 40, 2011. Pág. 269–282.

[21] LIU Shuangxi, LI Li, ZHU Tan. Application of activated carbon derived from scrap tires for adsorption of Rhodamine B. *Journal of Environmental Sciences*, 22, 2010. Pág. 1273 – 1280.

[22] GUPTA V., GUPTA Bina, RASTOGI Arshi, AGARWAL Shilpi, NAYAK Arunima. A comparative investigation on adsorption performances of mesoporous activated carbon prepared from waste rubber tire and activated carbon for a hazardous azo dye—Acid Blue 113. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 2011. Pág. 891 – 901.

[23] CARREÑO, Yurley; JAIMES Martha. Diseño preliminar de una planta piloto de adsorción en continuo. Bucaramanga, 2012. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

[24] BANSAL Roop, GOYAL Meenakshi. Activated Carbon Adsorption. Boca Ratón, Taylor & Francis Group, 2005. Pág. 1 – 2.

[25] ROUQUEROL Françoise, ROUQUEROL J., SING K. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. San Diego. Academic Press, 1998. Pág. 10.

[26] BONILLA Adrián, AGUAYO Ismael, HERNÁNDEZ Virginia, MONTES Miguel, REYNEL Hilda. Batch and column studies of  $Zn^{+2}$  removal from aqueous solution using chicken feathers as sorbents. Chemical Engineering Journal 167, 2011. Pág. 67 – 76.

[27] GUTIÉRREZ Edith, COLÍN Arturo, GARCÍA María M., AYESTARÁN Luz M. Aplicación del modelo de Thomas para la adsorción de cadmio y plomo en columna empacada con carbón activado. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química, 2006. Pág. 1 – 5.

[28] De CELIS, J.P., AMADEO N.E., CUKIERMAN A.L. In situ modification of activated carbons developed from a native invasive wood on removal of trace toxic metals from wastewater. Journal of Hazardous Materials, 161, 2009. Pág. 217 – 223.

[29] REBOLLO Juan. Eliminación de Cadmio(II) de efluentes urbanos tratados mediante procesos de bioadsorción: El efecto competitivo de otros metales pesados. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, 2012.

[30] RIVAS F.J., BELTRÁN F. J., GIMENO O., CARVALHO F., Adsorption of landfill onto activated carbon: Equilibrium and Kinetics. Journal of Hazardous Materials, 131, 2006. Pág. 170 – 178.

[31] GEANKOPLIS C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México. CECSA, 1998. Pág. 774 – 778.

[32] EL-SHAFFEY E.I., AL-HASHMI A.H.R. Sorption of lead and silver from aqueous solution on phosphoric acid dehydrated carbon. Journal of Environmental Chemical Engineering 1, 2013. Pág. 934 – 944.

[33] CATALDO Salvatore, CAVALLARO G., GIANGUZZA A., LAZZARA G., PETTIGNANO A., PIAZZESE D., VILLAESCUSA I. Kinetic and equilibrium study for cadmium and copper removal from aqueous solutions by sorption onto mixed alginate/pectin gel beads. Journal of Environmental Chemical Engineering 1, 2013. Pág. 1252 – 1260.

[34] Mc CABE W.L., SMITH J.C., HARRIOTT P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Cuarta edición. Madrid. McGraw-Hill, 1991. Pág. 797 – 798, 801 – 802.

[35] AHMAD A.A., HAMEED B.H. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. Journal of Hazardous Materials ,175, 2010. Pág. 298 – 303.

[36] HAN Runping, WANG Y., ZHAO X., WANG Y., XIE F., CHENG J., TANG M. Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves. Desalination, 245, 2009. Pág. 284 – 297.

[37] NABARLATZ, D; DE CELIS, J; BONELLI, P; CUKIERMAN, A. Batch and dynamic sorption of Ni(II) ions by activated carbon based on a native lignocellulosic precursor. Journal of Environmental Management, 97, 2012. Pág. 109 – 115.

[38] BORDA C., GUIRARDELLO R., SILVA E., VEIT M., TAVARES C. Removal of nickel(II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves. Biochemical Engineering Journal, 30, 2006. Pág. 184 – 191.

- [39] TREYBAL Robert E. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill, 1967. Pág. 625, 689.
- [40] COONEY David O. Adsorption Design for Wastewater Treatment. Lewis Publishers, 1998.
- [41] SONG J., ZOU W., BIAN Y., SU F., HAN R. Adsorption characteristics of methylene blue by peanut husk in batch and column modes. Desalination 265, 2011. Pág 119 – 125.
- [42] HAMED B., AHMAD A. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. Journal of Hazardous Materials, 175, 2010. Pág. 298 – 303.
- [43] VALENCIA J., CASTELLAR G. Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 66, 2013. Pág. 141 – 158.
- [44] RIVAS Germán. Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna. Granada. 2006. Tesis Doctoral. Universidad de Granada Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química.
- [45] YUE Qinyan, CHEN Suhong, GAO Baoyu, LI Qian, XU Xing, FU Kaifang. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by modified corn stalk: A fixed-bed column study. Bioresource Technology, 113, 2012. Pág. 114–120.
- [46] MONTGOMERY Douglas C. Probabilidad y estadística para ingeniería y administración. Segunda edición. México. Continental, 1996. Pág. 410 – 424.
- [47] WEBSTER Allen L. Estadística aplicada a los negocios y la economía. Tercera edición. Madrid. McGraw-Hill, 2001. Pág. 345 – 349.

[48] ALHAMED Yahia A. Adsorption kinetics and performance of packed bed adsorber for phenol removal using activated carbon from dates' stones. Journal of Hazardous Materials, 170, 2009. Pág. 763–770.

[49] Aquasoft S.A. Base de datos de Aquasoft S.A.[ Documento en línea].[Consultado 15 de Octubre de 2014]. Disponible en [http://www.dressilyme.com/wedding-dresses-2014-popular-styles-1-s4-p1.html?isStock=999&pageSize=36&listType=grid&sort=4&endPrice=798&startPrice=85&utm\\_source=facebook&utm\\_medium=cpm&utm\\_campaign=fb-Autumn%27sPopularStyles](http://www.dressilyme.com/wedding-dresses-2014-popular-styles-1-s4-p1.html?isStock=999&pageSize=36&listType=grid&sort=4&endPrice=798&startPrice=85&utm_source=facebook&utm_medium=cpm&utm_campaign=fb-Autumn%27sPopularStyles)

[50] BRUNAUER S., EMMETT P. H., TELLER E. “Citation Classics”. Journal of the American Chemical Society, 60, 1977. Pág. 309– 319.

[51] SADAF S., BHATTI H. N. Batch and fixed bed column studies for the removal of Indosol Yellow BG dye by peanut husk. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 45, 2014. Pág. 541–553.

[52] CHERN J. M., CHIEN Y. W. Adsorption of nitrophenol onto activated carbón: isotherms and breakthrough curves. Water Research, 36, 2002. Pág. 647–655.

## BIBLIOGRAFÍA

ABDELWAHAB O., AMIN N.K. Adsorption of phenol from aqueous solutions by *Luffa cylindrica* fibers: Kinetics, isotherm and thermodynamic studies. Egyptian Journal of Aquatic Research, 39, 2013. Pág. 215–223.

AHMAD A.A., HAMEED B.H. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. Journal of Hazardous Materials, 175, 2010. Pág. 298 – 303.

ALHAMED Yahia A. Adsorption kinetics and performance of packed bed adsorber for phenol removal using activated carbon from dates' stones. Journal of Hazardous Materials, 170, 2009. Pág. 763–770.

Aquasoft S.A. Base de datos de Aquasoft S.A.[ Documento en línea].[Consultado 15 de Octubre de 2014]. Disponible en [http://www.dressilyme.com/wedding-dresses-2014-popular-styles-1-s4-p1.html?isStock=999&pageSize=36&listType=grid&sort=4&endPrice=798&startPrice=85&utm\\_source=facebook&utm\\_medium=cpm&utm\\_campaign=fb-Autumn%27sPopularStyles](http://www.dressilyme.com/wedding-dresses-2014-popular-styles-1-s4-p1.html?isStock=999&pageSize=36&listType=grid&sort=4&endPrice=798&startPrice=85&utm_source=facebook&utm_medium=cpm&utm_campaign=fb-Autumn%27sPopularStyles)

AUTA Manase. Fixed bed adsorption studies of rhodamine B dye using oil palm empty fruits bunch activated carbon. Journal of Engineering Research and Studies, Vol 3. 2012. Pág. 3 – 6.

BANSAL Roop, GOYAL Meenakshi. Activated Carbon Adsorption. Boca Ratón, Taylor & Francis Group, 2005. Pág. 1 – 2.

BONILLA Adrián, AGUAYO Ismael, HERNÁNDEZ Virginia, MONTES Miguel, REYNEL Hilda. Batch and column studies of Zn<sup>+2</sup> removal from aqueous solution using chicken feathers as sorbents. Chemical Engineering Journal 167, 2011. Pág. 67 – 76.

BORDA C., GUIRARDELLO R., SILVA E., VEIT M., TAVARES C. Removal of nickel(II) ions from aqueous solution by biosorption in a fixed bed column: Experimental and theoretical breakthrough curves. *Biochemical Engineering Journal*, 30, 2006. Pág. 184 – 191.

BRUNAUER S., EMMETT P. H., TELLER E. "Citation Classics". *Journal of the American Chemical Society*, 60, 1977. Pág. 309– 319.

CANTILLO Melina, GIRALDO Liliana, MORENO Carlos. Preparación de carbones activados a partir de residuos de llantas. Activación física y química. *Revista Colombiana de Química*, 40, 2011. Pág. 269–282.

CARREÑO Jhonattan J., SCHOTBORGH Christian J. Evaluación de carbón activado obtenido a partir de llantas usadas para la adsorción en modo batch de Rodamina b, fenol y metales pesados. Bucaramanga, 2014. Tesis (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

CARREÑO, Yurley; JAIMES Martha. Diseño preliminar de una planta piloto de adsorción en continuo. Bucaramanga, 2012. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

CATALDO Salvatore, CAVALLARO G., GIANGUZZA A., LAZZARA G., PETTIGNANO A., PIAZZESE D., VILLAESCUSA I. Kinetic and equilibrium study for cadmium and copper removal from aqueous solutions by sorption onto mixed alginate/pectin gel beads. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 1, 2013. Pág. 1252 – 1260.

CHERN J. M., CHIEN Y. W. Adsorption of nitrophenol onto activated carbón: isotherms and breakthrough curves. *Water Research*, 36, 2002. Pág. 647–655.

CHONG Aik, JIA Qipeng. Adsorption of phenol by oil–palm-shell activated carbons in a fixed bed. *Chemical Engineering Journal*, 150, 2009. Pág. 455 – 461.

COONEY David O. Adsorption Design for Wastewater Treatment. Lewis Publishers, 1998.

De CELIS, J.P., AMADEO N.E., CUKIERMAN A.L. In situ modification of activated carbons developed from a native invasive wood on removal of trace toxic metals from wastewater. Journal of Hazardous Materials, 161, 2009. Pág. 217 – 223.

EKLUND Peter, GATZ Jennifer, ALLEN Jan. Applications for activated carbons from used tires: butane working capacity. Carbon, 37, 1999. Pág.1485 – 1489.

EL-SHAFFEY E.I., AL-HASHMI A.H.R. Sorption of lead and silver from aqueous solution on phosphoric acid dehydrated carbon. Journal of Environmental Chemical Engineering 1, 2013. Pág. 934 – 944.

FERNANDEZ R., PRIMAVERA O, COLPAS F., MEZA E. Carbones activados a partir de bagazo de caña de azúcar y zuro de maíz para la adsorción de cadmio y plomo. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 35, 2011. Pág. 387–396.

GALICIA Gamaliel. Remoción de un colorante de los efluentes de la industria textil mediante adsorción en una zeolita natural. México D.F. 2011. Tesis (Maestro en Ciencias (Ingeniería Química)). Universidad Autónoma Metropolitana.

GEANKOPLIS C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México. CECSA, 1998. Pág. 774 – 778.

GIRALDOLiliana, MORENOJuan Carlos. Study of adsorption of phenol on activated carbons obtained from eggshells. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 106, 2014. Pág. 41–47.

GRABOWSKA E. Lorenc, GRYGLEWICZ G., DIEZ M.A. Kinetics and equilibrium study of phenol adsorption on nitrogen-enriched activated carbons, Fuel,114, 2013. Pág. 235 – 243.

GUPTA V., GUPTA Bina, RASTOGI Arshi, AGARWAL Shilpi, NAYAK Arunima. A comparative investigation on adsorption performances of mesoporous activated carbon prepared from waste rubber tire and activated carbon for a hazardous azo dye—Acid Blue 113. *Journal of Hazardous Materials*, 186, 2011. Pág. 891 – 901.

GUTIÉRREZ Edith, COLÍN Arturo, GARCÍA María M., AYESTARÁN Luz M. Aplicación del modelo de Thomas para la adsorción de cadmio y plomo en columna empacada con carbón activado. Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Química, 2006. Pág. 1 – 5.

HAMED B., AHMAD A. Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 2010. Pág. 298 – 303.

HAMMACHE F. Oughlis, MAOUCHEN. Hamaidi, BENISSADF. Aissani, BACHA S. Bourouina. Central Composite Design for the Modeling of the Phenol Adsorption Process in a Fixed-Bed Reactor. *Journal Chemical & Engineering Data*, 55, 2010. Pág. 2489 – 2494.

HAN Runping, WANG Y., ZHAO X., WANG Y., XIE F., CHENG J., TANG M. Adsorption of methylene blue by phoenix tree leaf powder in a fixed-bed column: experiments and prediction of breakthrough curves. *Desalination*, 245, 2009. Pág. 284 – 297.

KARUNARATHNEAH.D.S.S., AMARASINGHEA B.M.W.P.K. Fixed bed adsorption column studies for the removal of aqueous phenol from activated carbon prepared from sugarcane bagasse. *Energy Procedia*, 34, 2013. Pág. 83 – 90.

KILIC Murat, VAROLEsin A., PÜTÜN Ayse E. Adsorptive removal of phenol from aqueous solutions on activated carbon prepared from tobacco residues:

Equilibrium, kinetics and thermodynamics. Journal of Hazardous Materials, 189, 2011. Pág. 397– 403.

LIU Shuangxi, LI Li, ZHU Tan. Application of activated carbon derived from scrap tires for adsorption of Rhodamine B. Journal of Environmental Sciences, 22, 2010. Pág. 1273 –1280.

LÜ Guocheng, HAO Jiao, LIU Liu, MA Hongwen, FANG Qinfang, WU Limei, WEI Mingquan, ZHANG Yihe. The Adsorption of Phenol by Lignite Activated Carbon, Separation Science and Engineering, 19, 2011. Pág. 380– 385.

MARTÍNEZ Octavio, HERNANDEZ César, GÓMEZ Raúl. Remoción de colorantes de efluentes de la industria textil. México D.F., 2010. Tesis (Licenciado en Ingeniería Química). Universidad Autónoma Metropolitana. Licenciatura en Ingeniería Química.

Mc CABE W.L., SMITH J.C., HARRIOTT P. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. Cuarta edición. Madrid. McGraw-Hill, 1991. Pág. 797 – 798, 801 – 802.

MEIKAP B.C. DWIVEDI C.P., SAHU J.N., MOHANTY C.R., MOHAN B.R., Column performance of granular activated carbon packed bed for Pb (II) removal. Journal of Hazardous Materials 156, 2008. Pág 596 – 603.

MENDIZÁBAL Eduardo, RÍOS Nely, CARRANZA Roxana de Jesús, GARCÍA Raúl, BLANCO Alicia, GARCÍA Beatriz. Eliminación de colorantes de disoluciones acuosas utilizando sulfato de quitosano. Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol 14. 2013. Pág. 256 – 263.

MONTGOMERY Douglas C. Probabilidad y estadística para ingeniería y administración. Segunda edición. México. Continental, 1996. Pág. 410 – 424.

NABARLATZ, D; DE CELIS, J; BONELLI, P; CUKIERMAN, A. Batch and dynamic sorption of Ni(II) ions by activated carbon based on a native lignocellulosic precursor. *Journal of Environmental Management*, 97, 2012. Pág. 109 – 115.

RAMÍREZ Jenny P., FLÓREZVANESSA A. Activación química de carbón pirolítico obtenido a partir de caucho de llantas usadas. Bucaramanga, 2013. Tesis (Ingenieros Químicos). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

RANGEL Jose, NIETO Cesar. Production of activated carbon from organic by-products from the alcoholic beverage industry: Surface area and hardness optimization by using the response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 34, 2011. Pág. 1528 – 1537.

REBOLLO Juan. Eliminación de Cadmio(II) de efluentes urbanos tratados mediante procesos de bioadsorción: El efecto competitivo de otros metales pesados. Universidad Politécnica de Cartagena. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, 2012.

RIVAS F.J., BELTRÁN F. J., GIMENO O., CARVALHOA F., Adsorption of landfill onto activated carbon: Equilibrium and Kinetics. *Journal of Hazardous Materials*, 131, 2006. Pág. 170 – 178.

RIVAS Germán. Caracterización de la biosorción de cromo con hueso de aceituna. Granada. 2006. Tesis Doctoral. Universidad de Granada Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química.

ROUQUEROL Françoise, ROUQUEROL J., SING K. Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications. San Diego. Academic Press, 1998. Pág. 10.

SADAF S., BHATTI H. N. Batch and fixed bed column studies for the removal of Indosol Yellow BG dye by peanut husk. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45, 2014. Pág. 541–553.

SALMAN Iqbal, AHMED Saadiyah, ABED Khulood. Adsorption study of rhodamine B dye on iraqi bentonite and modified bentonite by nanocompounds  $TiO_2$ ,  $ZnO$ ,  $Al_2O_3$  and sodium dodecyl sulfate. American Journal of Environmental Science 9, 2013. Pág. 269 – 279.

SONG J., ZOU W., BIAN Y., SU F., HAN R. Adsorption characteristics of methylene blue by peanut husk in batch and column modes. Desalination 265, 2011. Pág 119 – 125.

TREYBAL Robert E. Operaciones de transferencia de masa. Segunda edición. McGraw-Hill, 1967. Pág. 625, 689.

VALENCIA J., CASTELLAR G. Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 66, 2013. Pág. 141 – 158.

WEBSTER Allen L. Estadística aplicada a los negocios y la economía. Tercera edición. Madrid. McGraw-Hill, 2001. Pág. 345 – 349.

YUE Qinyan, CHEN Suhong, GAO Baoyu, LI Qian, XU Xing, FU Kaifang. Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solution by modified corn stalk: A fixed-bed column study. Bioresource Technology, 113, 2012. Pág. 114–120.

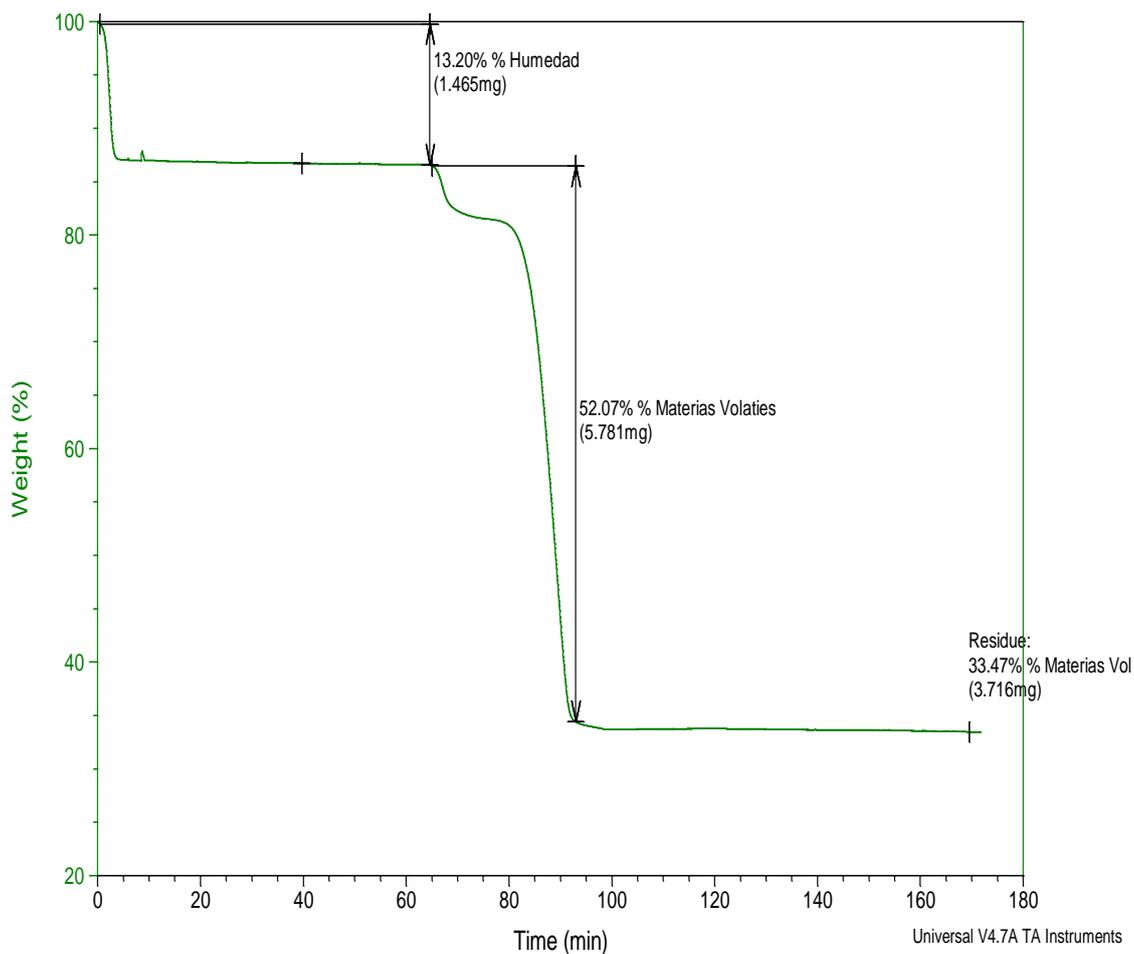
## ANEXOS

### ANEXO A. ANÁLISIS PRÓXIMO DE CARBÓN ACTIVADO DE LLANTAS (CAL)

Sample: Carbon Activado #427  
 Size: 11.1020 mg  
 Method: Gilles 2Cmin

TGA

File: G:\Carbon Activado #427.001  
 Operator: G.A.M.  
 Run Date: 30-Nov-2006 00:19  
 Instrument: 2050 TGA V5.1A



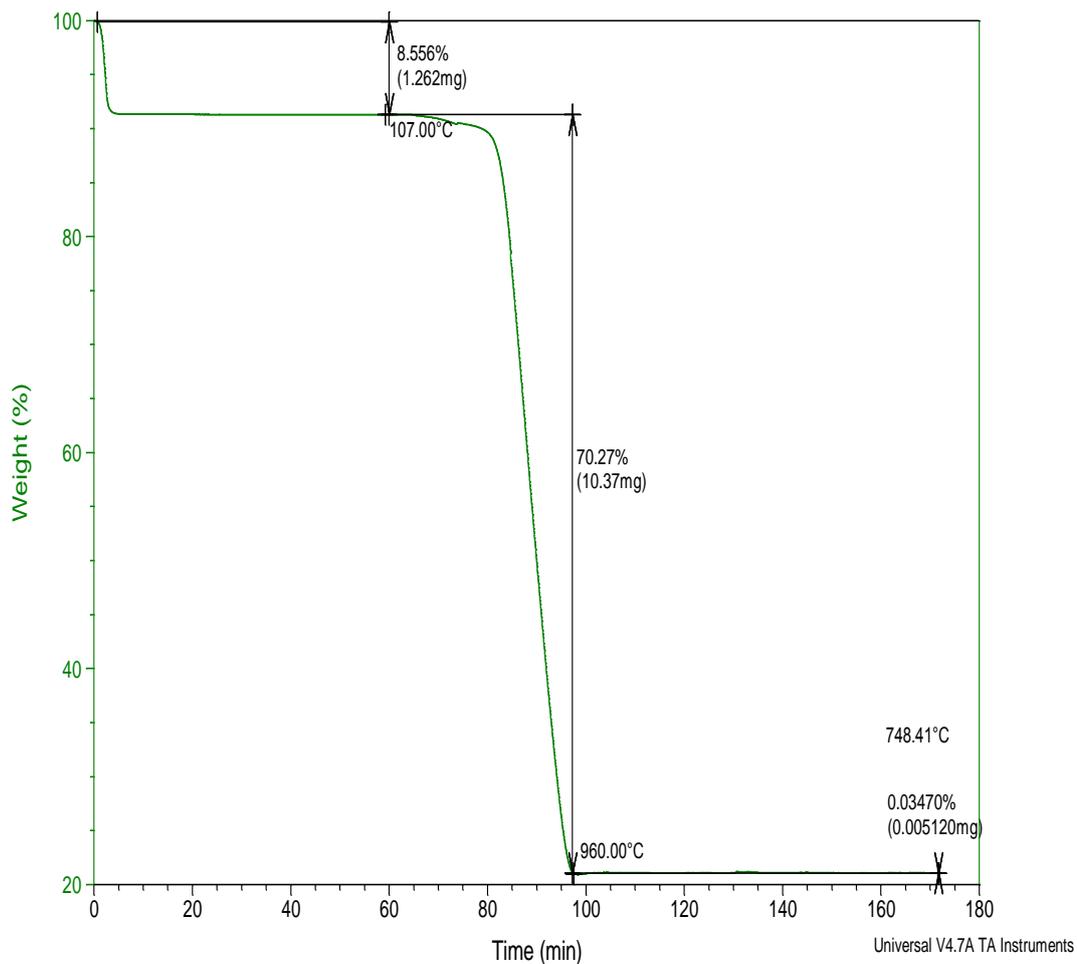
% Humedad	% Volátiles	% Carbón fijo	% Cenizas
13.20	52.07	1.26	33.47

## ANEXO B. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL (CAC)

Sample: Carbon Activado 2014  
 Size: 14.7520 mg  
 Method: Gilles 2Cmin

TGA

File: C:\...\Carbon Activado 2014.001  
 Operator: G.A.M.  
 Run Date: 30-Nov-2006 03:47  
 Instrument: 2050 TGA V5.1A

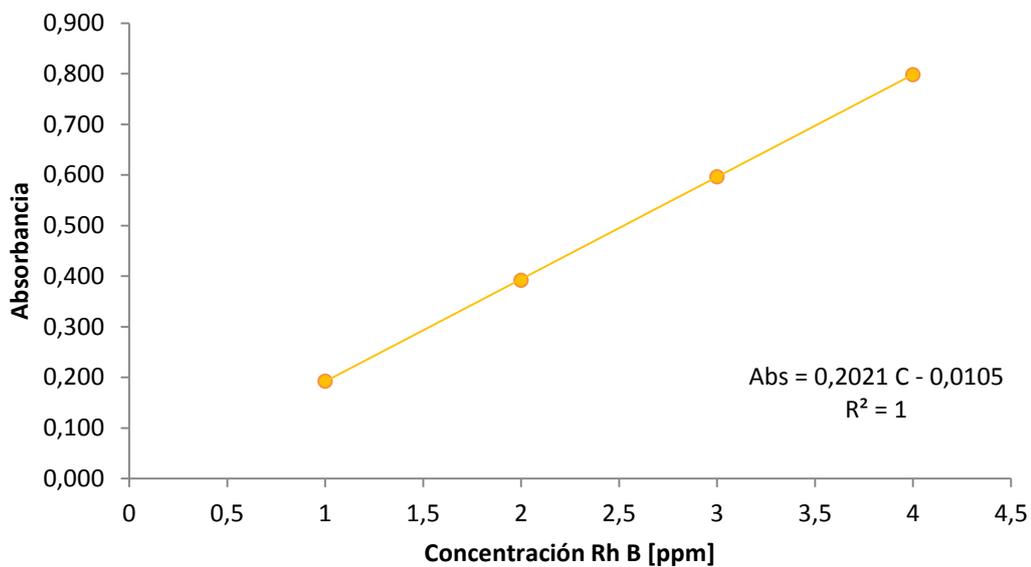


% Humedad	% Volátiles	% Carbón fijo	% Cenizas
<b>8.556</b>	<b>70.27</b>	<b>21.139</b>	<b>0.034</b>

### ANEXO C. CURVAS DE CALIBRACIÓN

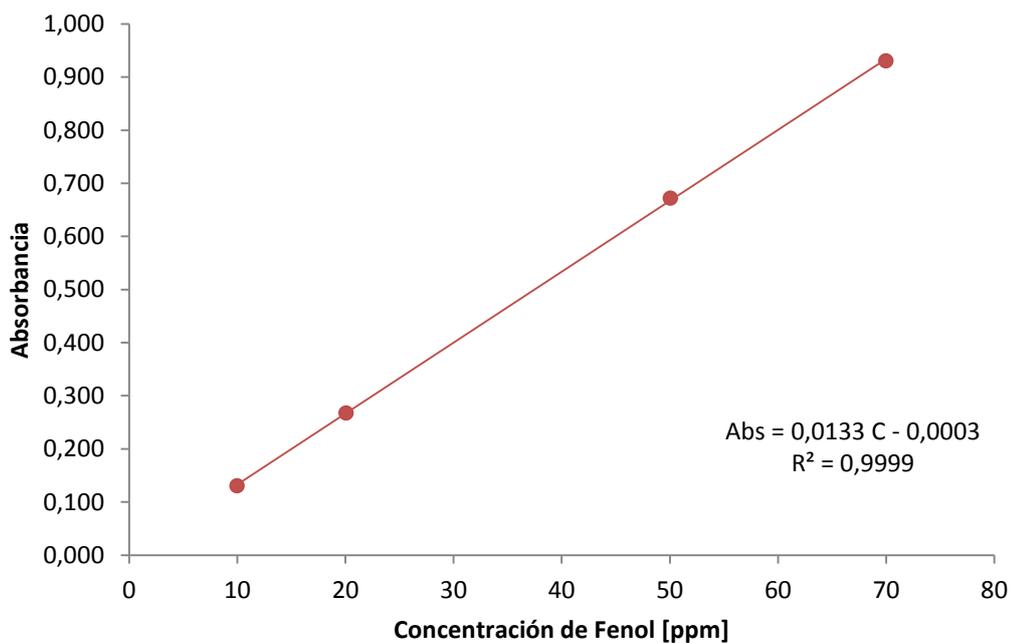
#### RODAMINA B

Longitud de onda: 556 nm



#### FENOL

Longitud de onda: 273 nm



## ANEXO D. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA DE FENOL SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO DE LLANTAS (CAL)

Tabla 1. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 18 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	20,92	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,70	0,00	0,14	0,01		
0,03	2	20,92	0,01	0,47	0,02	0,03	0,01
	Duplicado	20,70	0,01	0,77	0,04		
0,10	3	20,92	0,01	0,92	0,04	0,04	0,01
	Duplicado	20,70	0,01	0,59	0,03		
0,17	4	20,92	0,03	2,32	0,11	0,10	0,01
	Duplicado	20,70	0,03	2,02	0,10		
0,25	5	20,92	0,07	4,95	0,24	0,30	0,09
	Duplicado	20,70	0,10	7,50	0,36		
0,50	6	20,92	0,17	13,07	0,62	0,65	0,04
	Duplicado	20,70	0,19	14,12	0,68		
1	7	20,92	0,27	20,17	0,96	0,87	0,13
	Duplicado	20,70	0,22	16,23	0,78		
2	8	20,92	0,28	20,77	0,99	0,95	0,05
	Duplicado	20,70	0,25	18,97	0,92		
3	9	20,92	0,28	20,85	1,00	0,99	0,01
	Duplicado	20,70	0,27	20,32	0,98		

Tabla 2. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 9 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	20,70	0,01	0,51	0,02	0,02	0,00
	Duplicado	20,70	0,01	0,51	0,02		
0,03	2	20,70	0,03	1,94	0,09	0,15	0,09
	Duplicado	20,70	0,06	4,42	0,21		
0,10	3	20,70	0,07	5,40	0,26	0,32	0,09
	Duplicado	20,70	0,11	8,03	0,39		

<b>0,17</b>	4	20,70	0,12	9,08	0,44	0,47	0,05
	Duplicado	20,70	0,14	10,44	0,50		
<b>0,25</b>	5	20,70	0,21	15,51	0,75	0,67	0,11
	Duplicado	20,70	0,16	12,20	0,59		
<b>0,50</b>	6	20,70	0,24	18,18	0,88	0,87	0,00
	Duplicado	20,70	0,24	17,99	0,87		
<b>1</b>	7	20,70	0,27	20,51	0,99	0,98	0,01
	Duplicado	20,70	0,27	20,06	0,97		
<b>2</b>	8	20,70	0,27	20,51	0,99	0,99	0,00
	Duplicado	20,70	0,27	20,44	0,99		

Tabla 3. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 18 mm, caudal: 16 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C /Co	Promedio C/Co	Desviación
<b>0</b>	1	20,17	0,01	0,40	0,02	0,02	0,01
	Duplicado	20,02	0,00	0,25	0,01		
<b>0,03</b>	2	20,17	0,02	1,26	0,06	0,06	0,01
	Duplicado	20,02	0,01	1,00	0,05		
<b>0,10</b>	3	20,17	0,05	3,41	0,17	0,15	0,03
	Duplicado	20,02	0,03	2,58	0,13		
<b>0,17</b>	4	20,17	0,10	7,50	0,37	0,37	0,00
	Duplicado	20,02	0,10	7,35	0,37		
<b>0,25</b>	5	20,17	0,17	12,77	0,63	0,65	0,02
	Duplicado	20,02	0,18	13,29	0,66		
<b>0,50</b>	6	20,17	0,23	17,50	0,87	0,84	0,04
	Duplicado	20,02	0,22	16,23	0,81		
<b>1</b>	7	20,17	0,26	19,61	0,97	0,96	0,02
	Duplicado	20,02	0,25	18,93	0,95		
<b>2</b>	8	20,17	0,27	20,14	1,00	1,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,27	19,98	1,00		

Tabla 4. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 18 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 50 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C /Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	50,92	0,01	0,62	0,01	0,03	0,00
	Duplicado	50,92	0,03	2,32	0,05		
0,03	2	50,92	0,02	1,38	0,03	0,10	0,01
	Duplicado	50,92	0,12	8,97	0,18		
0,10	3	50,92	0,13	9,91	0,19	0,23	0,01
	Duplicado	50,92	0,18	13,82	0,27		
0,17	4	50,92	0,24	17,80	0,35	0,35	0,01
	Duplicado	50,92	0,24	17,77	0,35		
0,25	5	50,92	0,36	27,24	0,53	0,53	0,09
	Duplicado	50,92	0,35	26,56	0,52		
0,50	6	50,92	0,61	45,55	0,89	0,87	0,04
	Duplicado	50,92	0,57	42,65	0,84		
1	7	50,92	0,67	50,74	1,00	0,99	0,13
	Duplicado	50,92	0,67	50,40	0,99		
2	8	50,92	0,69	51,71	1,02	1,01	0,05
	Duplicado	50,92	0,68	50,96	1,00		

## ANEXO E. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA FENOL SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.

Tabla 5. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	20,77	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,03	2	20,77	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,10	3	20,77	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,17	4	20,77	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,25	5	20,77	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,50	6	20,77	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
1	7	20,77	0,00	0,14	0,01	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
2	8	20,77	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,06	0,00		
3	9	20,77	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
4	10	20,77	0,00	0,36	0,02	0,01	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,25	0,01		
5	11	20,77	0,05	3,97	0,19	0,10	0,13
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
6	12	20,77	0,06	4,57	0,22	0,16	0,08
	Duplicado	20,02	0,03	2,05	0,10		
8	13	20,77	0,11	8,18	0,39	0,37	0,04
	Duplicado	20,02	0,09	6,79	0,34		
10	14	20,77	0,15	11,19	0,54	0,54	0,00
	Duplicado	20,02	0,14	10,81	0,54		
12	15	20,77	0,17	12,95	0,62	0,62	0,00
	Duplicado	20,02	0,17	12,47	0,62		
14	16	20,77	0,20	14,95	0,72	0,69	0,04
	Duplicado	20,02	0,18	13,33	0,67		
16	17	20,77	0,21	16,15	0,78	0,77	0,02

	Duplicado	20,02	0,20	15,14	0,76		
18	18	20,77	0,23	17,54	0,84	0,83	0,02
	Duplicado	20,02	0,22	16,23	0,81		
20	19	20,77	0,24	18,18	0,88	0,87	0,00
	Duplicado	20,02	0,23	17,39	0,87		
22	20	20,77	0,25	18,82	0,91	0,90	0,01
	Duplicado	20,02	0,24	17,88	0,89		
24	21	20,77	0,26	19,27	0,93	0,92	0,01
	Duplicado	20,02	0,24	18,33	0,92		

Tabla 6. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 8,5 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C /Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	20,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,03	2	20,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,10	3	20,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,17	4	20,02	0,01	0,66	0,03	0,02	0,02
	Duplicado	20,02	0,00	0,02	0,00		
0,25	5	20,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,03
	Duplicado	20,02	0,01	0,77	0,04		
0,50	6	20,02	0,00	0,02	0,00	0,03	0,04
	Duplicado	20,02	0,02	1,30	0,06		
1	7	20,02	0,00	0,06	0,00	0,04	0,06
	Duplicado	20,02	0,02	1,71	0,09		
2	8	20,02	0,02	1,86	0,09	0,14	0,06
	Duplicado	20,02	0,05	3,74	0,19		
3	9	20,02	0,07	5,51	0,28	0,26	0,02
	Duplicado	20,02	0,07	4,95	0,25		
4	10	20,02	0,12	9,01	0,45	0,48	0,04
	Duplicado	20,02	0,14	10,21	0,51		
5	11	20,02	0,16	12,02	0,60	0,66	0,09
	Duplicado	20,02	0,19	14,61	0,73		
6	12	20,02	0,18	13,89	0,69	0,74	0,07
	Duplicado	20,02	0,21	15,92	0,80		

8	13	20,02	0,23	17,39	0,87	0,88	0,02
	Duplicado	20,02	0,24	17,88	0,89		
10	14	20,02	0,24	18,14	0,91	0,90	0,01
	Duplicado	20,02	0,24	17,88	0,89		
12	15	20,02	0,24	18,41	0,92	0,92	0,00
	Duplicado	20,02	0,25	18,48	0,92		

Tabla 7. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 16 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C /Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	20,17	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,02	0,00		
0,03	2	20,17	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,02	0,00		
0,10	3	20,17	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,02	0,00		
0,17	4	20,17	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,02	0,00		
0,25	5	20,17	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,10	0,00		
0,50	6	20,17	0,00	0,17	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,14	0,01		
1	7	20,17	0,00	0,25	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,17	0,01		
2	8	20,17	0,00	0,36	0,02	0,02	0,00
	Duplicado	19,95	0,00	0,29	0,01		
3	9	20,17	0,02	1,34	0,07	0,05	0,02
	Duplicado	19,95	0,01	0,74	0,04		
4	10	20,17	0,04	3,07	0,15	0,14	0,02
	Duplicado	19,95	0,03	2,43	0,12		
5	11	20,17	0,08	6,30	0,31	0,27	0,06
	Duplicado	19,95	0,06	4,65	0,23		
6	12	20,17	0,10	7,58	0,38	0,37	0,00
	Duplicado	19,95	0,10	7,43	0,37		
8	13	20,17	0,16	12,24	0,61	0,60	0,01
	Duplicado	19,95	0,16	11,86	0,59		
10	14	20,17	0,21	15,92	0,79	0,73	0,08
	Duplicado	19,95	0,18	13,44	0,67		

12	15	20,17	0,23	17,28	0,86	0,84	0,03
	Duplicado	19,95	0,22	16,30	0,82		
14	16	20,17	0,24	17,69	0,88	0,86	0,02
	Duplicado	19,95	0,23	16,94	0,85		
16	17	20,17	0,24	18,26	0,90	0,89	0,03
	Duplicado	19,95	0,23	17,28	0,87		

Tabla 8. Datos experimentales para las curvas de ruptura de fenol sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 50 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C /Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
0,03	2	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
0,10	3	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
0,17	4	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
0,25	5	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
0,50	6	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
1	7	49,87	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,42	0,00	0,02	0,00		
2	8	49,87	0,12	8,82	0,18	0,18	0,00
	Duplicado	49,42	0,12	8,82	0,18		
3	9	49,87	0,25	18,97	0,38	0,38	0,00
	Duplicado	49,42	0,25	18,97	0,38		
4	10	49,87	0,27	20,59	0,41	0,41	0,00
	Duplicado	49,42	0,27	20,59	0,42		
5	11	49,87	0,32	24,05	0,48	0,55	0,10
	Duplicado	49,42	0,41	30,66	0,62		
6	12	49,87	0,41	30,66	0,61	0,62	0,00
	Duplicado	49,42	0,41	30,66	0,62		
8	13	49,87	0,51	38,59	0,77	0,83	0,09
	Duplicado	49,42	0,59	44,20	0,89		
10	14	49,87	0,58	43,37	0,87	0,91	0,06
	Duplicado	49,42	0,62	46,94	0,95		

12	15	49,87	0,60	45,10	0,90	0,94	0,04
	Duplicado	49,42	0,64	47,80	0,97		

## ANEXO F. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA RODAMINA B SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO DE LANTAS

Tabla 9. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 18 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	19,92	0,03	0,19	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	20,21	0,01	0,09	0,00		
0,03	2	19,92	0,02	0,14	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	20,21	0,01	0,09	0,00		
0,10	3	19,92	0,01	0,11	0,01	0,00	0,00
	Duplicado	20,21	0,01	0,08	0,00		
0,17	4	19,92	0,01	0,10	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,21	0,00	0,07	0,00		
0,25	5	19,92	0,02	0,14	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	20,21	0,00	0,07	0,00		
0,50	6	19,92	0,03	0,22	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	20,21	0,03	0,21	0,01		
1	7	19,92	0,09	0,48	0,02	0,02	0,00
	Duplicado	20,21	0,07	0,41	0,02		
2	8	19,92	0,02	1,46	0,07	0,05	0,01
	Duplicado	20,21	0,12	0,64	0,03		
3	9	19,92	0,04	2,28	0,11	0,10	0,01
	Duplicado	20,21	0,03	1,83	0,09		
4	10	19,92	0,09	4,90	0,25	0,23	0,07
	Duplicado	20,21	0,08	4,45	0,22		
5	11	19,92	0,18	9,25	0,46	0,42	0,09
	Duplicado	20,21	0,14	7,47	0,37		
6	12	19,92	0,24	12,54	0,63	0,58	0,04
	Duplicado	20,21	0,20	10,61	0,53		
7	13	19,92	0,29	14,65	0,74	0,67	0,01
	Duplicado	20,21	0,24	12,39	0,61		
8	14	19,92	0,30	15,17	0,76	0,73	0,03
	Duplicado	20,21	0,27	14,08	0,70		
10	15	19,92	0,31	16,06	0,81	0,76	0,03
	Duplicado	20,21	0,28	14,47	0,72		
12	16	19,92	0,31	15,96	0,80	0,74	0,09
	Duplicado	20,21	0,26	13,58	0,67		
14	17	19,92	0,33	16,82	0,84	0,81	0,02

	Duplicado	20,21	0,31	15,71	0,78		
16	18	19,92	0,33	17,05	0,86	0,85	0,00
	Duplicado	20,21	0,33	16,95	0,84		
18	19	19,92	0,34	17,42	0,87	0,87	0,00
	Duplicado	20,21	0,34	17,32	0,86		
20	20	19,92	0,35	17,62	0,88	0,88	0,00
	Duplicado	20,21	0,35	17,74	0,88		

Tabla 10. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 9 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/o	Desviación
0	1	20,21	0,03	0,20	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	19,82	0,03	0,19	0,01		
0,03	2	20,21	0,10	0,56	0,03	0,05	0,03
	Duplicado	19,82	0,27	1,38	0,07		
0,10	3	20,21	0,11	0,57	0,03	0,07	0,06
	Duplicado	19,82	0,45	2,27	0,11		
0,17	4	20,21	0,21	1,09	0,05	0,10	0,07
	Duplicado	19,82	0,05	2,89	0,15		
0,25	5	20,21	0,30	1,55	0,08	0,13	0,08
	Duplicado	19,82	0,07	3,76	0,19		
0,50	6	20,21	0,09	4,87	0,24	0,25	0,01
	Duplicado	19,82	0,09	5,17	0,26		
1	7	20,21	0,10	5,52	0,27	0,27	0,01
	Duplicado	19,82	0,10	5,24	0,26		
2	8	20,21	0,12	6,23	0,31	0,30	0,02
	Duplicado	19,82	0,10	5,67	0,29		
3	9	20,21	0,23	11,80	0,58	0,52	0,09
	Duplicado	19,82	0,17	9,01	0,45		
4	10	20,21	0,26	13,58	0,67	0,61	0,08
	Duplicado	19,82	0,21	11,03	0,56		
5	11	20,21	0,31	16,08	0,80	0,74	0,08
	Duplicado	19,82	0,26	13,41	0,68		
6	12	20,21	0,35	17,79	0,88	0,84	0,06
	Duplicado	19,82	0,31	15,86	0,80		
7	13	20,21	0,37	18,70	0,93	0,91	0,02
	Duplicado	19,82	0,35	17,81	0,90		
8	14	20,21	0,37	18,68	0,92	0,93	0,00

	Duplicado	19,82	0,36	18,38	0,93		
10	15	20,21	0,37	18,93	0,94	0,94	0,01
	Duplicado	19,82	0,37	18,70	0,94		
12	16	20,21	0,38	19,37	0,96	0,95	0,01
	Duplicado	19,82	0,37	18,68	0,94		
14	17	20,21	0,38	19,50	0,96	0,96	0,00
	Duplicado	19,82	0,38	19,12	0,97		

Tabla 11. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 18 mm, caudal: 16 mL/min y concentración: 20 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	19,92	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	19,77	0,00	0,06	0,00		
0,03	2	19,92	0,01	0,11	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	19,77	0,01	0,11	0,01		
0,10	3	19,92	0,04	0,27	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	19,77	0,02	0,16	0,01		
0,17	4	19,92	0,09	0,48	0,02	0,02	0,01
	Duplicado	19,77	0,04	0,23	0,01		
0,25	5	19,92	0,10	0,56	0,03	0,03	0,00
	Duplicado	19,77	0,09	0,48	0,02		
0,50	6	19,92	0,02	1,31	0,07	0,05	0,03
	Duplicado	19,77	0,10	0,55	0,03		
0,67	7	19,92	0,03	2,23	0,11	0,07	0,06
	Duplicado	19,77	0,12	0,63	0,03		
1	8	19,92	0,03	1,98	0,10	0,10	0,00
	Duplicado	19,77	0,03	1,98	0,10		
2	9	19,92	0,07	3,81	0,19	0,16	0,04
	Duplicado	19,77	0,04	2,60	0,13		
3	10	19,92	0,12	6,66	0,33	0,28	0,08
	Duplicado	19,77	0,08	4,30	0,22		
4	11	19,92	0,23	12,02	0,60	0,50	0,15
	Duplicado	19,77	0,14	7,67	0,39		
5	12	19,92	0,27	14,10	0,71	0,65	0,09
	Duplicado	19,77	0,22	11,53	0,58		
6	13	19,92	0,30	15,34	0,77	0,73	0,05
	Duplicado	19,77	0,27	13,76	0,70		
7	14	19,92	0,31	16,03	0,80	0,80	0,01

	Duplicado	19,77	0,30	15,54	0,79		
8	15	19,92	0,34	17,10	0,86	0,85	0,01
	Duplicado	19,77	0,33	16,70	0,84		
10	16	19,92	0,33	17,00	0,85	0,87	0,02
	Duplicado	19,77	0,34	17,42	0,88		
12	17	19,92	0,35	17,64	0,89	0,90	0,01
	Duplicado	19,77	0,35	17,89	0,90		
14	18	19,92	0,35	18,01	0,90	0,90	0,01
	Duplicado	19,77	0,35	17,64	0,89		
16	19	19,92	0,36	18,41	0,92	0,91	0,01
	Duplicado	19,77	0,35	17,89	0,90		

Tabla 12. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado de llantas. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 18 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 50 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	48,57	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,16	0,01	0,11	0,00		
0,03	2	48,57	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,16	0,02	0,13	0,00		
0,10	3	48,57	0,02	0,14	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	49,16	0,01	0,09	0,00		
0,17	4	48,57	0,06	0,36	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	49,16	0,03	0,20	0,00		
0,25	5	48,57	0,18	0,93	0,02	0,02	0,00
	Duplicado	49,16	0,21	1,07	0,02		
0,50	6	48,57	0,05	2,99	0,06	0,09	0,05
	Duplicado	49,16	0,12	6,28	0,13		
1	7	48,57	0,08	4,38	0,09	0,13	0,06
	Duplicado	49,16	0,16	8,44	0,17		
2	8	48,57	0,25	12,91	0,27	0,31	0,06
	Duplicado	49,16	0,33	17,07	0,35		
3	9	48,57	0,46	23,23	0,48	0,53	0,07
	Duplicado	49,16	0,56	28,38	0,58		
4	10	48,57	0,63	31,89	0,66	0,68	0,03
	Duplicado	49,16	0,68	34,17	0,70		
5	11	48,57	0,75	37,58	0,77	0,78	0,01
	Duplicado	49,16	0,77	38,42	0,78		
6	12	48,57	0,89	44,63	0,92	0,91	0,01

	Duplicado	49,16	0,88	44,26	0,90		
<b>7</b>	13	48,57	0,97	48,32	0,99	0,99	0,01
	Duplicado	49,16	0,97	48,49	0,99		
<b>8</b>	14	48,57	0,96	48,00	0,99	0,99	0,01
	Duplicado	49,16	0,98	48,94	1,00		

## ANEXO G. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA RODAMINA B SOBRE EL CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL.

Tabla 13. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0,00	1,00	21,10	0,01	0,08	0,00	0,00	0,00
	Duplicado	20,06	0,00	0,07	0,00		
0,03	2,00	21,10	0,01	0,11	0,01	0,01	0,00
	Duplicado	20,06	0,03	0,19	0,01		
0,10	3,00	21,10	0,18	0,92	0,04	0,03	0,02
	Duplicado	20,06	0,04	0,27	0,01		
0,17	4,00	21,10	0,04	2,45	0,12	0,07	0,06
	Duplicado	20,06	0,09	0,49	0,02		
0,25	5,00	21,10	0,06	3,27	0,15	0,10	0,07
	Duplicado	20,06	0,01	1,04	0,05		
0,50	6,00	21,10	0,13	6,90	0,33	0,24	0,12
	Duplicado	20,06	0,06	3,27	0,16		
1	7,00	21,10	0,21	11,13	0,53	0,49	0,05
	Duplicado	20,06	0,17	9,05	0,45		
2	8,00	21,10	0,26	13,36	0,63	0,62	0,01
	Duplicado	20,06	0,24	12,32	0,61		
3	9,00	21,10	0,29	14,67	0,70	0,70	0,00
	Duplicado	20,06	0,27	14,05	0,70		
4	10,00	21,10	0,31	15,83	0,75	0,74	0,01
	Duplicado	20,06	0,29	14,75	0,73		
5	11,00	21,10	0,31	15,88	0,75	0,75	0,00
	Duplicado	20,06	0,30	15,14	0,75		

Tabla 14. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 8,5 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0,00	1	20,86	0,05	0,32	0,02	0,01	0,00
	Duplicado	20,21	0,04	0,26	0,01		

0,03	2	20,86	0,05	0,29	0,01	0,02	0,01
	Duplicado	20,21	0,11	0,60	0,03		
0,10	3	20,86	0,11	0,57	0,03	0,04	0,01
	Duplicado	20,21	0,20	1,04	0,05		
0,17	4	20,86	0,17	8,78	0,42	0,24	0,25
	Duplicado	20,21	0,26	1,31	0,06		
0,25	5	20,86	0,20	10,49	0,50	0,59	0,09
	Duplicado	20,21	0,27	13,88	0,69		
0,50	6	20,86	0,26	13,46	0,65	0,71	0,04
	Duplicado	20,21	0,30	15,46	0,76		
1	7	20,86	0,28	14,42	0,69	0,72	0,01
	Duplicado	20,21	0,29	15,02	0,74		
2	8	20,86	0,26	13,41	0,64	0,74	0,08
	Duplicado	20,21	0,33	16,75	0,83		
3	9	20,86	0,27	14,05	0,67	0,79	0,11
	Duplicado	20,21	0,36	18,43	0,91		
4	10	20,86	0,34	17,17	0,82	0,89	0,03
	Duplicado	20,21	0,38	19,15	0,95		
5	11	20,86	0,35	17,94	0,86	0,95	0,07
	Duplicado	20,21	0,41	21,00	1,04		
6	12	20,86	0,34	17,49	0,84	0,93	0,07
	Duplicado	20,21	0,41	20,76	1,03		
7	13	20,86	0,35	17,69	0,85	0,96	0,09
	Duplicado	20,21	0,42	21,50	1,06		

Tabla 15. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 16 mL/min y concentración: 20 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
0,00	1	20,86	0,01	0,10	0,00	0,01	0,00
	Duplicado	20,21	0,00	0,07	0,01		
0,03	2	20,86	0,02	0,16	0,05	0,15	0,00
	Duplicado	20,21	0,01	0,12	0,24		
0,10	3	20,86	0,20	1,05	0,29	0,40	0,00
	Duplicado	20,21	0,17	0,88	0,51		
0,17	4	20,86	0,09	4,87	0,68	0,73	0,07
	Duplicado	20,21	0,04	2,67	0,77		
0,25	5	20,86	0,11	6,09	0,83	0,85	0,04
	Duplicado	20,21	0,09	4,85	0,87		

<b>0,50</b>	6	20,86	0,20	10,29	0,82	0,85	0,11
	Duplicado	20,21	0,13	6,95	0,88		
<b>1</b>	7	20,86	0,28	14,15	0,68	0,60	0,11
	Duplicado	20,21	0,20	10,44	0,52		
<b>2</b>	8	20,86	0,31	15,66	0,75	0,74	0,02
	Duplicado	20,21	0,28	14,60	0,72		
<b>3</b>	9	20,86	0,34	17,27	0,83	0,79	0,05
	Duplicado	20,21	0,30	15,31	0,76		
<b>4</b>	10	20,86	0,34	17,57	0,84	0,82	0,03
	Duplicado	20,21	0,32	16,18	0,80		
<b>5</b>	11	20,86	0,34	17,19	0,82	0,82	0,00
	Duplicado	20,21	0,32	16,55	0,82		
<b>6</b>	12	20,86	0,35	17,86	0,86	0,83	0,04
	Duplicado	20,21	0,32	16,28	0,81		

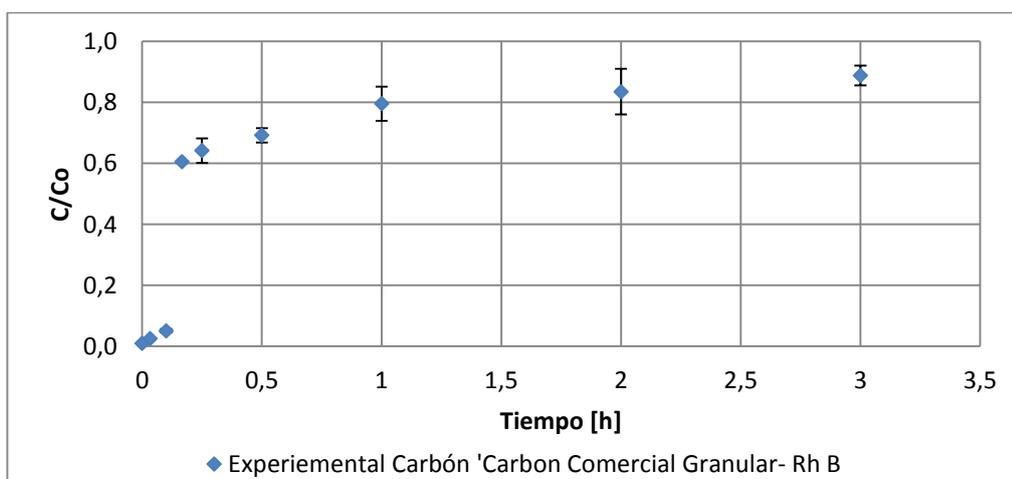
Tabla 16. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 50 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C/Co	Promedio C/Co	Desviación
<b>0,00</b>	1	48,47	0,20	1,04	0,02	0,02	0,18
	Duplicado	49,65	0,27	1,40	0,03		
<b>0,03</b>	2	48,47	0,13	7,05	0,15	0,15	0,01
	Duplicado	49,65	0,15	8,16	0,16		
<b>0,10</b>	3	48,47	0,32	16,40	0,34	0,36	0,03
	Duplicado	49,65	0,38	19,07	0,38		
<b>0,17</b>	4	48,47	0,46	23,08	0,48	0,50	0,03
	Duplicado	49,65	0,51	25,66	0,52		
<b>0,25</b>	5	48,47	0,59	29,61	0,61	0,64	0,05
	Duplicado	49,65	0,67	33,55	0,68		
<b>0,50</b>	6	48,47	0,77	38,67	0,80	0,79	0,01
	Duplicado	49,65	0,78	39,16	0,79		
<b>1</b>	7	48,47	0,85	42,78	0,88	0,88	0,01
	Duplicado	49,65	0,87	43,42	0,87		
<b>2</b>	8	48,47	0,86	43,12	0,89	0,88	0,01
	Duplicado	49,65	0,87	43,52	0,88		
<b>3</b>	9	48,47	0,91	45,55	0,94	0,93	0,01
	Duplicado	49,65	0,92	46,04	0,93		

## ANEXO H. DATOS EXPERIMENTALES PARA LAS CURVAS DE RUPTURA RODAMINA B SOBRE EL CARBÓN COMERCIAL GRANULAR.

Tabla 17. Datos experimentales para las curvas de ruptura de Rodamina B sobre el carbón activado comercial. Condiciones experimentales: Altura de lecho: 17 mm, caudal: 8 mL/min y concentración: 20 ppm.

Tiempo [h]	Muestra	Co [ppm]	Absorbancia promedio	C [ppm]	C /Co	Promedio C/Co	Desviación
0	1	18,860	0,027	0,183	0,010	0,010	0,000
	Duplicado	19,075	0,026	0,181	0,009		
0,033	2	18,860	0,084	0,465	0,025	0,025	0,001
	Duplicado	19,075	0,089	0,490	0,026		
0,1	3	18,860	0,199	1,034	0,055	0,051	0,006
	Duplicado	19,075	0,169	0,888	0,047		
0,167	4	18,860	0,221	11,430	0,606	0,606	0,000
	Duplicado	19,075	0,223	11,554	0,606		
0,25	5	18,860	0,245	12,642	0,670	0,642	0,040
	Duplicado	19,075	0,226	11,702	0,613		
0,5	6	18,860	0,260	13,360	0,708	0,692	0,023
	Duplicado	19,075	0,250	12,890	0,676		
1	7	18,860	0,308	15,760	0,836	0,796	0,056
	Duplicado	19,075	0,281	14,424	0,756		
2	8	18,860	0,328	16,749	0,888	0,835	0,075
	Duplicado	19,075	0,291	14,918	0,782		
3	9	18,860	0,320	16,329	0,866	0,889	0,033
	Duplicado	19,075	0,341	17,392	0,912		



**Figura 10.** Curvas de ruptura para la adsorción de Rh B con carbón comercial granular (H= 18 mm; Co= 20 ppm; Q= 8 ml/min; T= ±24°C)..