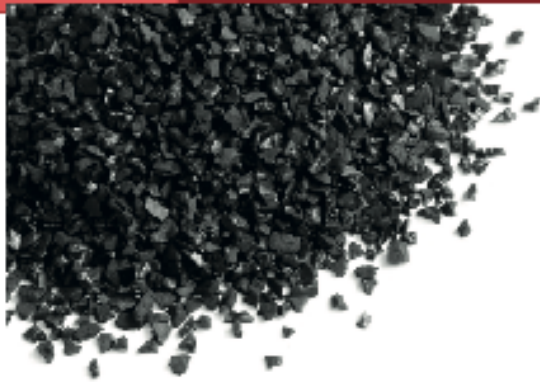




TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

DE TEXTILERIA UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO



TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

DE TEXTILERIA UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO

PRIMERA EDICIÓN

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
DE TEXTILERA UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO**

MSc. Luis Bonilla Abarca

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE TEXTILERIA
UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO

Primera edición
AGOSTO 2017

Libro sometido a revisión de pares académicos.

Queda rigurosamente prohibidos, bajo las sanciones de las leyes; la reproducción, almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.



Edición
Diagramación
Diseño
Publicación

Maquetación.

Grupo Compás

Cámara Ecuatoriana del Libro - ISBN-E: 978-9942-760-71-5

Guayaquil - Ecuador

Tratamiento de Aguas Residuales de textilera utilizando carbón activado
Primera Edición: Agosto 2017

Autor: MSc. Luis Bonilla Abarca, Dra. Martha Bermeo Garay, MSc. Stefanie Bonilla Bermeo, Msc. Ivan Viteri García

Diagramación: Ing. Arnaldo Rodríguez Mateo

Fotos, Imágenes: MSc. Luis Bonilla Abarca.

Email: luis.bonillaa@ug.edu.ec

Queda rigurosamente prohibidos, bajo las sanciones de las leyes; la reproducción, almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Guayaquil - Ecuador
2017

CONTENIDO

1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	13
1.1. GENERALIDADES	13
1.2. TIPOS DE TRATAMIENTO APLICABLES A AGUAS RESIDUALES	13
1.3. PRETRATAMIENTO	15
1.4. TRATAMIENTO PRIMARIO	15
1.5. TRATAMIENTO SECUNDARIO	15
1.6. TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO	15
1.6.1. Clasificación de las tecnologías de tratamiento	16
1.7. ADSORCIÓN	18
1.7.1. Concepto	18
1.7.2. Proceso de Adsorción	18
1.7.3. Tipos de Adsorción	19
1.7.3.1. Adsorción física	19
1.7.3.2. La adsorción química	24
1.7.3.3. La adsorción de intercambio	25
1.8. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE ADSORCIÓN	25
1.8.1. Temperatura	25
1.8.2. pH	25
1.8.3. Tiempo de Contacto	26
1.8.4. Tamaño de partícula del Carbón	26
1.9. CARBÓN ACTIVADO	26
1.9.1. Origen del carbón activado	27
1.9.2. Preparación de carbones activados	28
1.9.3. Procedimiento de activación	28
1.9.3.1. Procedimiento físico	29
1.9.3.2. Procedimiento químico	30
1.9.4. Reactivación de carbones activados	31
1.9.5. Características físico-químicas del carbón activado	31
1.9.5.1. Composición química	31
1.9.5.2. Estructura física del carbón activo	32
1.9.6. Usos del carbón activado	33
1.9.7. Tipos de carbón	34
1.9.7.1. Carbón activado granular	35

1.9.7.2. Características físicas importantes en un carbón activado granular	37
1.9.7.3. Carbón activado en polvo	38
1.9.8. Capacidad de adsorción de un carbón	40
1.9.9. Isotermas de adsorción	40
1.9.10. Clases de isotermas de adsorción	40
1.9.10.1. Isoterma de Langmuir	40
1.9.10.2. Isoterma de adsorción BET	41
1.9.10.3. Isoterma de Freundlich	41
1.9.10.4. Capacidad teórica de adsorción de un carbón basada en los datos de la isoterma	43
1.9.10.5. Capacidad de agotamiento de adsorción	44
1.9.11. Curva típica de ruptura para la adsorción en un proceso continuo	44
1.9.12. Zona de transferencia de masa	45
1.9.13. Diseño de las columnas de adsorción de laboratorio con carbón activado	46

2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN **51**

2.1. ANTECEDENTES	51
2.2. RAZONES PARA CONSTRUIR COLUMNAS PARA ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO	51
2.3. PARÁMETROS UTILIZADOS DE DISEÑO	51
2.4. CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS DE LABORATORIO BASÁNDOSE EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	52
2.5. DIAGRAMA DEL EQUIPO	53
2.6. INSTRUMENTOS Y ACCESORIOS ADICIONALES DE CONTROL	54
2.7. ESPECIFICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR UTILIZADO	57
2.8. PROCESO DE OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS DE LABORATORIO	59

3. EXPERIMENTACIÓN **63**

3.1. EFLUENTE INDUSTRIAL UTILIZADO PARA LA EXPERIMENTACIÓN	63
3.1.1. Descripción del proceso de producción	65
3.1.2. Caracterización del agua residual producida por la industria textil	67
3.1.3. Descripción del proceso de tratamiento en la planta de las	

aguas residuales industriales de la industria textil	71
3.1.4. Caracterización del efluente de la planta de tratamiento	71
3.2. ENSAYOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN PROCESO “BATH”	73
3.2.1. Procedimiento experimental para determinar la Isoterma de Freundlich	73
3.2.2. Pruebas experimentales preliminares para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado en proceso “Batch”	75
3.2.3. Datos experimentales para el cálculo de la Isoterma de Freundlich obtenidos en la Prueba de Jarras	75
3.2.3.1. Análisis matemático de los datos experimentales	76
3.3. CORRIDA EXPERIMENTAL EN LAS COLUMNAS DE LABORATORIO EN PROCESO CONTINUO PARA LA DETERMINACION DE LAS CURVAS TÍPICAS DE RUPTURA	79
3.3.1. Determinación de las curvas típicas de ruptura para la adsorción con el carbón activado a partir de los datos del experimento 3 y las pruebas A, B, C.	97
3.4. OBTENCIÓN DE DATOS PARA LOS GRÁFICOS BÁSICOS DE DISEÑO	98
3.4.1. Obtención de datos para el gráfico tiempo de operación vs profundidad del lecho	98
3.4.2. Cálculo del volumen total tratado para la Prueba A	99
3.4.3. Cálculo de velocidad, v ; pendiente, s y capacidad de adsorción, N_0	101
3.4.4. Cálculo de la constante de velocidad de adsorción, k , altura crítica del lecho, D_0 , intersección de las rectas de la Figura 21 Con la ordenada, i .	102
3.4.5. Representación gráfica de la capacidad de adsorción, n_0 , constante de velocidad de adsorción, k , altura crítica del lecho, d_0 , en función de la carga hidráulica.	104
3.4.5.1. Representación gráfica de la carga hidráulica vs altura crítica del lecho, D_0	104
3.4.5.2. Representación gráfica de la carga hidráulica vs constante de velocidad de adsorción, k	105
4. CASOS PRÁCTICOS DE DISEÑO	111
4.1. PROCESO DISCONTINUO, “BACTH”	111
4.1.1. Aplicación de la ecuación de la isoterma de Freundlich a un diseño a escala industrial	111
4.2. PROCESO CONTINUO	112

4.2.1. Cálculo de la capacidad teórica de adsorción del carbón activado granular Darco 12 x 20	112
4.2.2. Determinación del tiempo de agotamiento en una columna de laboratorio con capacidad teórica de adsorción usando la isoterma de Freundlich	112
4.2.3. Aplicación de los gráficos obtenidos en las pruebas experimentales a un diseño a escala industrial	113
5. BIBLIOGRAFÍA	117
6. GLOSARIO DE TÉRMINOS	119
7. ABREVIATURAS	127

INTRODUCCIÓN

El tratamiento terciario o tratamiento avanzado es una serie de procesos destinado a conseguir una calidad de efluente superior a la del tratamiento secundario, siendo uno de los principales la adsorción con carbón activado. Éste se emplea en el tratamiento de las aguas residuales dependiendo de la calidad del efluente que se requiera obtener; es utilizado para la eliminación de sustancias disueltas, pudiendo ser: materia orgánica refractaria no biodegradable, nutrientes y compuestos tóxicos específicos que no son eliminados por tratamientos convencionales.

El progreso del conocimiento científico de los constituyentes del agua residual y el acceso a una información amplia sobre el medio ambiente están conduciendo a adoptar normas más restrictivas para el vertido de efluentes tratados muchos de los cuales necesitan tratamientos avanzados.

Existen zonas donde los recursos hídricos son muy limitados haciéndose indispensable la reutilización de agua residual por aspecto económico, debiendo tratarse esta agua con procesos terciarios.

En vista de que en nuestro medio no se han realizado investigaciones profundas sobre tratamientos avanzados, se ha escogido uno de ellos, el tratamiento de efluentes con lechos de carbón, para determinar las distintas variables del proceso y llegar a un diseño que permita aprovechar la capacidad de adsorción que tiene el carbón activado para remover muchos materiales contaminantes especialmente orgánicos refractarios.

Esta investigación trata acerca de la aplicación de los tratamientos terciarios o avanzados a las aguas residuales y, más específicamente, la aplicación de la operación unitaria adsorción con carbón activado, para la remoción de contaminantes orgánicos que producen olores y sabores, trihalometanos, pesticidas y compuestos orgánicos de cloro, residuos orgánicos tóxicos y metales pesados, con la finalidad de obtener una calidad de efluente superior a la obtenida por los tratamientos convencionales y que cumpla con la legislación ambiental pertinente.

Experimentalmente se utilizó el agua residual tratada de una industria textil y se obtuvieron en laboratorio, en proceso "batch", los datos necesarios para la representación de la Isoterma de Freundlich, y a partir de ella se determinó la capacidad de adsorción del carbón activado granular Darco 12 x 20 producido por la empresa Norit, disponible en el mercado, con características específicas para el fin propuesto.

Con la utilización de columnas de laboratorio de carbón activado, construidas con las

recomendaciones de Rúbeas Ramalho, se determinaron las curvas típicas de ruptura para adsorción con carbón activado y los parámetros de diseño tales como: capacidad de adsorción (N_0); constante de velocidad de adsorción (K); profundidad crítica de lechos de carbón (D_0); también las curvas, patrón, tiempo de servicio de la columna vs profundidad del lecho de carbón y la representación de: N_0 , K y D_0 vs carga hidráulica.

Se aplicaron los datos, las variables de diseño de las curvas, patrón, obtenidas tanto en proceso "batch", como continuo en las columnas de laboratorio a un diseño a escala real, que sirvan de base para aplicaciones en el campo industrial.

CAPÍTULO I

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES



1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

1.1. GENERALIDADES

El objetivo básico del tratamiento de agua es proteger la salud y promover el bienestar de los individuos miembros de la sociedad.

El retorno de las aguas residuales a los ríos o lagos convierte a la población humana en sus usuarios directos o indirectos, y a medida que crece, aumenta la necesidad de proveer sistemas de tratamiento o renovación del recurso hídrico afectado que permita eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente.

En la concepción clásica del problema de la contaminación del agua, los ríos se consideran los receptores naturales de las aguas residuales, con sus cargas correspondientes de contaminantes y nutrientes. Las cargas o la concentración de contaminantes nutrientes constituyen el objeto de la regulación, por parte de leyes, decretos y normas, para establecer la calidad apropiada del agua, de acuerdo con los diferentes usos aplicables a ella.

La complejidad del sistema de tratamiento es, por tanto, función de los objetivos propuestos. Teniendo en cuenta el gran número disponible de operaciones y procesos para el tratamiento del agua es necesario identificar sus diversas etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado.

1.2. TIPOS DE TRATAMIENTO APLICABLES A AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de las aguas residuales presupone la aplicación de procesos básicos y operaciones unitarias, cuya utilización y secuencia están definidas por las características del agua a tratar y nivel de depuración que se debe conseguir. La mayor parte de los procesos a utilizar, están variando constantemente, existiendo en el mercado una gran variedad de equipos para un mismo proceso.

Las diferentes operaciones básicas se clasifican según el grado de reducción de la contaminación, así como el mecanismo del proceso, existiendo una clasificación arbitraria pero admitida generalmente. En la tabla 1, se indica la mayor parte de los procesos utilizados para el tratamiento de las aguas residuales.

Tratamiento de aguas residuales
de textilera utilizando carbón activado

Tabla 1. Tipo de Tratamiento aplicable a aguas residuales

PRETRATAMIENTO	TRATAMIENTO PRIMARIO	TRATAMIENTO SECUNDARIO	TRATAMIENTO TERCARIO
Cribado o desbrozo	Sedimentación	El proceso de lodos activados puede diseñarse como: - Lodos activados convencionales - Aireación prolongada o extendida - Estabilización por contacto - Aireación escalonada - Mezcla completa - Aireación modificada - Dos etapas - Oxígeno puro	Filtración por membrana: - microfiltración, - ultrafiltración, - nanofiltración, - ósmosis inversa
	Flotación	Laguna con aireación	Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas)
Aliviadero de agua en exceso		Lagunas de estabilización	Precipitación o coagulación
Tamizado	Homogenización	Filtros biológicos (percoladores)	Adsorción (carbón activado) Destilación
Trituración de los elementos retenidos en el cribado	Neutralización	Discos biológicos	Intercambio iónico
Desarenado		Tratamientos anaerobios: proceso de contacto filtros (sumergidos)	Electrodialisis
Separación de grasas y aceites			Desinfección: - Cloración - Ozonización - Destrucción química - Irradiación: UV
			Proceso de reducción de nutrientes Desorción o arrastre con aire

Fuente: R. S. Ramalho, Editorial Reverté, S.A., 1996.

1.3. PRETRATAMIENTO

El pre tratamiento se lo aplica para eliminar todo el material grueso que generalmente esta flotando y que da impacto visual negativo. La función es extraer de las aguas brutas la mayor cantidad posible de la materias que arrastran, y que posteriormente ocasionarían problemas en los tratamientos posteriores (tales como obstrucción de tuberías, formación de costras, enarenado de digestores anaerobios, etc. (Bermeo, 2017)

En ocasiones es necesario aplicar pre cloración, pre aireación, pre decantación antes de operaciones como desbaste, desarenado desengrasado etc. (Tejero, 1992)

1.4. TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario, se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos, mediante sedimentación u otro medio, y constituye un método de preparar el agua para el tratamiento secundario. Por lo regular el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y 35 a 40% de la DBO suspendida (Cuido el Agua, 2009).

1.5. TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario, se usa principalmente para la remoción de la materia orgánica soluble y los sólidos suspendidos e incluye, por ello, los procesos biológicos de lodos activados, filtros percoladores, sistemas de lagunas y sedimentación, lechos fluidizados, etc (Cuido el Agua, 2009).

1.6. TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO

Tratamiento avanzado o terciario tiene como objetivo complementar los procesos anteriormente mencionados, hasta lograr cumplir las normas ambientales eliminando los contaminantes específicos presentes en el agua residual; para aumentar la calidad del efluente, antes de que éste sea descargado al cuerpo receptor ya sea mar, río, lago, campo, etc. (Romero Rojas, 2000)

El tratamiento avanzado del agua residual, se define como aquel adicional necesario para la eliminación de los sólidos suspendidos y las sustancias disueltas que permanecen en ella después del tratamiento secundario convencional. Estas sustancias pueden ser materia orgánica o sólidos en suspensión, y su naturaleza puede variar desde iones inorgánicos relativamente simples, como el calcio, potasio, sulfato, nitrato y fos-

fato, hasta un número cada vez mayor de compuestos orgánicos sintéticos muy complejos. En el transcurso de los últimos años, se ha conseguido tener un conocimiento mucho más completo sobre el efecto de estas sustancias en el medio ambiente. La investigación sobre los posibles efectos tóxicos de estas sustancias en el medio ambiente continua, así como la investigación sobre los procesos de tratamiento, tanto convencionales como aquellos en etapas de desarrollo, dirigidos a su eliminación. Como consecuencia de ello, las normas sobre el tratamiento de las aguas residuales, se están volviendo, cada vez más estrictas, tanto en lo referente a la limitación de las concentraciones de muchas de estas sustancias en los efluentes de las plantas de tratamiento, como en el establecimiento de los límites globales de toxicidad de ellos. Para cumplir las nuevas normas, será necesario remodelar muchas de las instalaciones existentes de tratamiento secundario y construir instalaciones nuevas de tratamiento avanzado.

1.6.1. Clasificación de las tecnologías de tratamiento

La clasificación de métodos de tratamiento es en función de tipo de operación u proceso unitario como se detallan en las tablas 2 y 3.

Tabla 2. Tipo de Tratamiento aplicable a aguas residuales

PRINCIPAL FUNCIÓN DE ELIMINACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN O EL PROCESO	TIPO DE AGUA RESIDUAL TRATADA
Eliminación de sólidos suspendidos	Filtración Microtamices	ETP, ETS ETS
Oxidación de amoníaco	Nitrificación biológica	ETP, ETB, ETS
Eliminación de nitrógeno	Nitrificación/desnitrificación biológica	ETP, ETS
Eliminación de nitratos	Desnitrificación biológica en etapas separadas	ETS + nitrificación
Eliminación biológica de fósforo	Eliminación de fósforo en la línea principal	ARC, ETP
	Eliminación de fósforo en la línea auxiliar	LAR
Eliminación biológica conjunta de nitrógeno y fósforo	Nitrificación/desnitrificación biológica y eliminación de fósforo	ARC, ETP
Eliminación física o química de nitrógeno	Arrastre por aire	ETS
	Cloración al punto de ruptura	ETS + filtración
	Intercambio iónico	ETS + filtración
Eliminación de fósforo por adición de reactivos químicos	Precipitación química con sales metálicas	ARC, ETP, ETB, ETS
	Precipitación química con cal	ARC, ETP, ETS
Eliminación de compuestos tóxicos y materia orgánica refractaria	Adsorción sobre carbón	ETS + filtración
	Lodos activados – carbón activado en polvo	ETP
	Oxidación química	ETS + filtración
Eliminación de sólidos inorgánicos disueltos	Precipitación química	ARC, ETP, ETB, ETS
	Intercambio iónico	ETS + filtración
	Ultrafiltración	ETS + filtración
	Ósmosis inversa	ETS + filtración
	Electrodialisis	ETS + filtración + adsorción sobre carbón
Compuestos orgánicos volátiles	Volatilización y arrastre con gas	ARC, ETP

Fuente: Ingeniería de Aguas Residuales (tabla 11-2), volumen 2, Metcalf y Eddy, Mc. Graw-Hill, Interamericana de España, S.A., 1995

- ETP = efluente de tratamiento primario.
- ETB = efluente de tratamiento biológico (sin decantación).
- ETS = efluente de tratamiento secundario (con decantación)
- ARC = agua residual cruda (no tratada).
- LAR = lodo activado recirculado.

Tabla 3. Procesos de tratamiento empleados para la eliminación de compuestos tóxicos.

PROCESO	APLICACIÓN DE ELIMINACION
Adsorción sobre carbón activado	Compuestos orgánicos naturales y sintéticos entre los que se incluyen los compuestos orgánicos volátiles (COVs); pesticidas; metales pesados.
Lodos activados – carbón activado en polvo	Metales pesados; amoníaco; determinados contaminantes prioritarios refractarios.
Arrastre con aire	COVs y amoníaco
Coagulación química, sedimentación y filtración	Metales pesados
Oxidación química	Amoníaco; compuestos refractarios y compuestos tóxicos alifáticos y aromáticos halogenados
Tratamiento biológico convencional (lodos activados, filtros percoladores)	Fenoles; hidrocarburos hidrogenados seleccionados.

Fuente: Ingeniería de Aguas Residuales (tabla 11-34), volumen 2, Metcalf y Eddy, Mc. Graw-Hill, Interamericana de España, S.A., 1995

1.7. ADSORCIÓN

1.7.1. Concepto

La adsorción es un fenómeno de superficie por el cual los átomos o las moléculas de impurezas en solución, se adhieren a la superficie de un sólido. El sólido se denomina adsorbente y el soluto, a adsorber, se denomina adsorbato (Romero Rojas, 2000, pág. 311).

1.7.2. Proceso de Adsorción

Este proceso tiene lugar cuando se coloca la superficie del sólido en contacto con una solución. Una capa de moléculas de soluto se acumula en la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. En el interior del sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares y, por lo tanto, sujetas a fuerzas equilibradas. Las moléculas en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas (Ramalho, Tratamiento de Aguas Residuales, 2003, pág. 586).

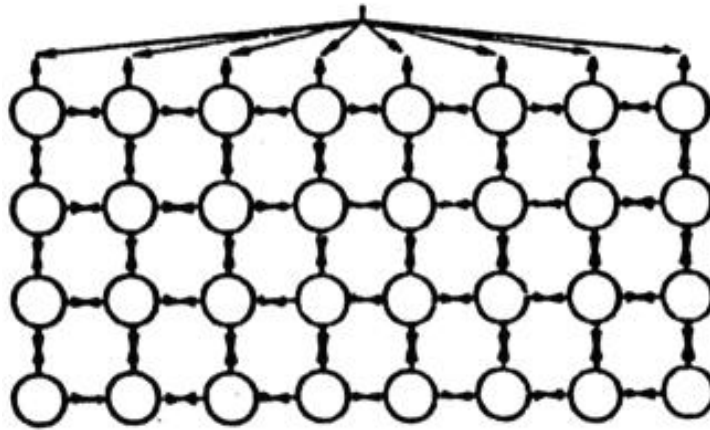


Figura 1. Representación de fuerzas en un sólido

Fuente: (Ramalho, 2003), Fig 8.1

1.7.3. Tipos de Adsorción

En general existen 3 tipos de adsorción: física, química y de intercambio.

1.7.3.1. Adsorción física

Las fuerzas de la superficie del sólido son suficientemente elevadas que pueden atrapar moléculas no polares de un soluto gracias a fuerzas intermoleculares (la atracción de unas moléculas por otras) llamadas también como fuerzas de Van Der Waals, físico holandés, quien destacó por primera vez su importancia (Romero Rojas, 2000, pág. 311).

En este caso las moléculas adsorbidas tienen movimiento libre sobre la superficie del sólido adsorbente y no están unidas a un sitio específico y pueden formar varias capas superpuestas sobre la superficie del adsorbente, siendo por lo general reversible (Romero Rojas, 2000, pág. 311).

Se analizarán tres tipos de fuerzas intermoleculares:

- **Fuerzas de London o de dispersión.**- Las fuerzas de London se presentan en todas las sustancias moleculares. Son el resultado de la atracción entre los extremos positivo y negativo de dipolos inducidos en moléculas adyacentes (Figura 2). Cuando los electrones de una molécula adquieren momentáneamente una distribución no uniforme, provocan que en una molécula vecina se forme momentáneamente un dipolo inducido. En la figura 4 se ilustra como una

molécula con una falta de uniformidad momentánea en la distribución de su carga eléctrica puede inducir un dipolo en una molécula vecina por un proceso llamado polarización. Incluso los átomos de los gases nobles, las moléculas de gases diatómicos como el oxígeno, el nitrógeno y el cloro (que deben ser no polares) y las moléculas de hidrocarburos no polares como el CH_4 , C_2H_6 tienen tales dipolos instantáneos (TextosCientíficos, 2005).

La intensidad de las fuerzas de London depende de la facilidad con que se polarizan los electrones de una molécula, y eso depende del número de electrones en la molécula y de la fuerza con que los sujeta la atracción nuclear. En general, cuantos más electrones haya en una molécula más fácilmente podrá polarizarse. Así, las moléculas más grandes con muchos electrones son relativamente polarizables. En contraste, las moléculas más pequeñas son menos polarizables porque tienen menos electrones. Las fuerzas de London varían entre aproximadamente 0.05 y 40 kJ/mol (TextosCientíficos, 2005).

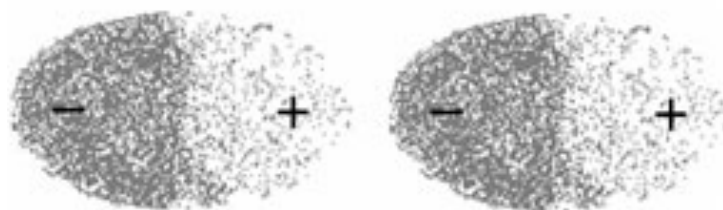


Figura 2. Origen de las fuerzas de London
Fuente: (TextosCientíficos, 2005)

- **Atracciones dipolo-dipolo.** Una atracción dipolo-dipolo es una interacción no covalente entre dos moléculas polares o dos grupos polares de la misma molécula si ésta es grande. En la sección anterior explicamos cómo se forman moléculas que contienen dipolos permanentes cuando se enlazan simétricamente con átomos con electronegatividad diferente. Las moléculas que son dipolos se atraen entre sí cuando la región positiva de una está cerca de la región negativa de la otra (TextosCientíficos, 2005).

En un líquido las moléculas están muy cercanas entre sí y se atraen por sus fuerzas intermoleculares. Las moléculas deben tener suficiente energía para vencer esas fuerzas de atracción, y hacer que el líquido pueda entrar en ebullición. Si se requiere más energía para vencer las atracciones de las moléculas del líquido A que aquéllas entre las moléculas del líquido B, el punto de ebullición de A es más alto que el de B. Recíprocamente, menores atracciones intermoleculares dan pie a puntos de ebullición más bajos (TextosCientíficos, 2005).

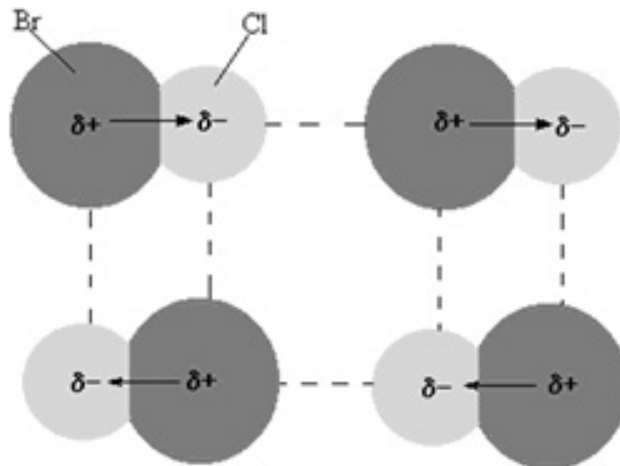


Figura 3. Atracciones dipolo-dipolo (líneas punteadas) entre moléculas de BrCl.
Fuente: (TextosCientíficos, 2005)

- **Puentes de hidrógeno.**- Es un tipo especial de interacción dipolo-dipolo entre el átomo de hidrógeno que está formando un enlace polar, tal como N—H, O—H, ó F—H, y un átomo electronegativo como O, N ó F (TextosCientíficos, 2005). Esta interacción se representa de la forma siguiente:



A y B representan O, N ó F; A—H es una molécula o parte de una molécula y B es parte de otra. La línea de puntos representa el enlace de hidrógeno. La energía media de un enlace de hidrógeno es bastante grande para ser una interacción dipolo-dipolo (mayor de 40 KJ/mol). Esto hace que el enlace de hidrógeno sea una de gran importancia a la hora de la adopción de determinadas estructuras y en las propiedades de muchos compuestos (TextosCientíficos, 2005).

Las primeras evidencias de la existencia de este tipo de interacción vinieron del estudio de los puntos de ebullición. Normalmente, los puntos de ebullición de compuestos que contienen a elementos del mismo grupo aumentan con el peso molecular. Pero, como se puede observar en la Figura 4, los compuestos de los elementos de los Grupos 15, 16 y 17 no siguen esta norma. Para cada uno de los grupos, los compuestos de menos peso molecular (NH₃, H₂O, HF) tienen el punto de ebullición más alto, en contra de lo que se podría esperar en principio. Ello es debido a que existe algún tipo de interacción entre las moléculas en estado líquido que se opone al paso al estado de vapor. Esa interacción es el enlace de hidrógeno, y afecta a los primeros miembros de la serie pues son los más electronegativos, y por ello el enlace X-H es el más polarizado, lo que induce la mayor interacción por puente de hidrógeno (TextosCientíficos, 2005).

Los puentes de hidrógeno son especialmente fuertes entre las moléculas de agua y son la causa de muchas de las singulares propiedades de esta sustancia. Los compuestos de hidrógeno de elementos vecino al oxígeno y de los miembros de su familia en la tabla periódica, son gases a la temperatura ambiente: CH_4 , NH_3 , H_2S , H_2Te , PH_3 , HCl . En cambio, el H_2O es líquida a la temperatura ambiente, lo que indica un alto grado de atracción intermolecular. En la Figura 4 se puede ver que el punto de ebullición del agua es 200°C más alto de lo que cabría predecir si no hubiera puentes de hidrógeno. Los puentes de hidrógeno juegan también un papel crucial en la estructura del ADN, la molécula que almacena la herencia genética de todos los seres vivos (TextosCientíficos, 2005).

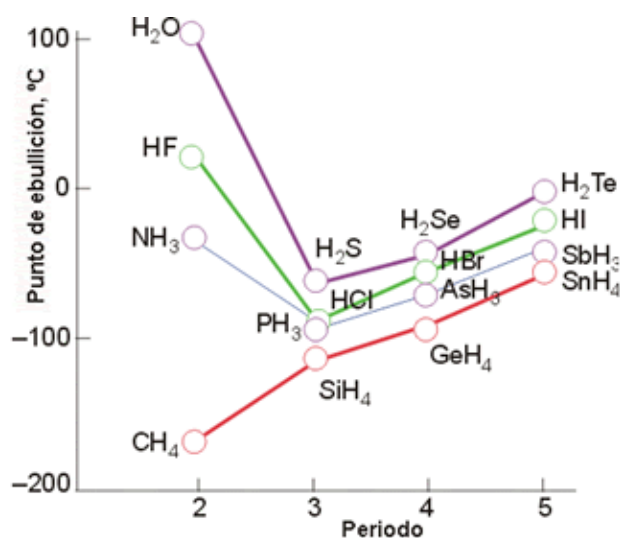


Figura 4. Variación de los puntos de ebullición de los hidruros moleculares.
Fuente: (TextosCientíficos, 2005)

Enlaces químicos

Los enlaces químicos son las fuerzas de atracción que mantienen unidos entre sí a los átomos o iones para formar moléculas o cristales. Los tipos presentes de enlaces en una sustancia, son responsables en gran medida, de las propiedades físicas y químicas de ella (Burns, 1996, pág. 213).

Enlaces iónicos

Los átomos metálicos pierden electrones para formar iones cuyos niveles externos de energía están vacíos por completo, mientras que los átomos no metálicos ganan electrones para formar iones con niveles externos de energía totalmente ocupados. Sólo los electrones de valencia de un átomo participan en la transferencia de electrones; el núcleo interno de electrones no cambia. A la tendencia de los átomos no metálicos a

ganar electrones hasta tener ocho electrones de valencia, se llama la regla del octeto. Como los átomos de hidrogeno sólo pueden alojar dos electrones, obedecen la regla del dueto en vez del octeto (Burns, 1996, pág. 214).

Los metales tienden a perder sus electrones de valencia para formar iones positivos (cationes).

Los no metales tienden a ganar electrones para formar iones negativos (aniones). Cuando se transfieren electrones, se forman iones estables con un octeto de electrones. Los enlaces iónicos, se forman por una transferencia completa de electrones.

Enlaces Covalentes

Si sólo hay átomos presentes de hidrógeno, un hidrógeno no puede tomar un electrón de otro átomo; todos los átomos de hidrógeno atraen a los electrones en la misma medida. En vez de ello, los átomos de hidrógeno tienden a adquirir la configuración deseada del gas noble helio compartiendo electrones. Dos átomos de hidrógeno, cada uno con un electrón, comparten un par electrónico para formar una molécula de hidrógeno (Burns, 1996, pág. 218).

Al par compartido de electrones de la molécula, se lo llama enlace covalente.

Molécula no polar.- tiene una forma molecular y distribución electrónica equilibrada y simétrica (Burns, 1996, pág. 219).

Enlace covalente no polar.- es aquel, en el cual, los pares de electrones se comparten de manera equitativa entre dos átomos del mismo elemento; ejemplo: la molécula de hidrógeno (Burns, 1996, pág. 219).

Moléculas polares.- aunque, en general, las moléculas son eléctricamente neutras, no siempre es simétrica la distribución de las cargas positivas y negativas; esta distribución irregular conduce a la existencia de las moléculas polares.

Las moléculas polares actúan como si tuvieran polos positivos y negativos, por lo que se llaman dipolos. Una molécula polar tiene una forma molecular y distribución electrónica desequilibrada.

Las fuerzas de atracción entre las moléculas son originadas por los dipolos, que en un líquido tienden a unirse por sus polos opuestos para formar cadenas de moléculas. En general los líquidos compuestos de moléculas polares, se mezclan con otros también polares, pero los líquidos polares no se mezclan con los no polares; pero los líquidos no polares si se mezclan entre si.

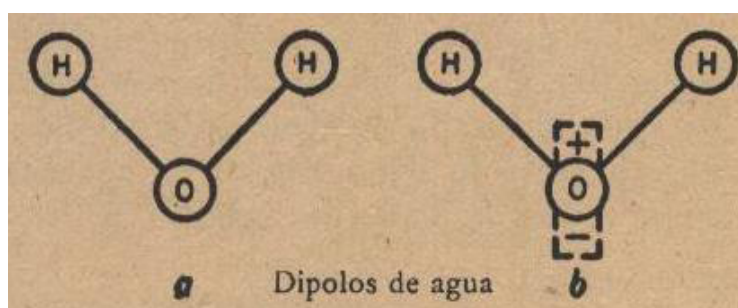
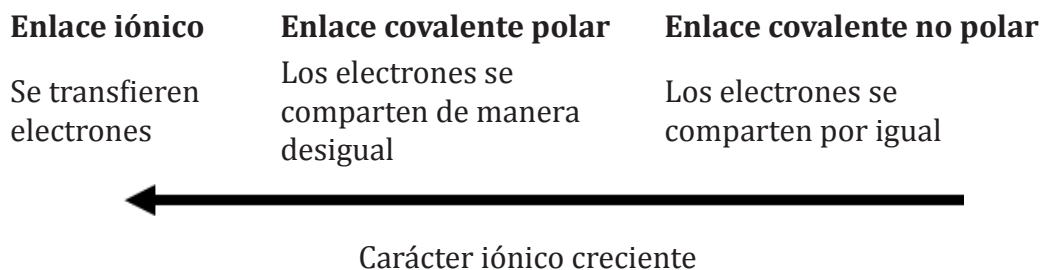


Figura 5. Representación de fuerzas dipolares
Fuente: (Babor & Ibarz Aznárez, 1963)

Enlace covalente polar.- entre los distintos tipos de enlaces se encuentra, en un extremo el enlace iónico, en el que los electrones se transfieren de un átomo a otro para formar iones. En el otro extremo, está el enlace covalente no polar de las moléculas diatómicas, donde la distribución electrónica se encuentra perfectamente equilibrada entre átomos que ejercen una atracción equivalente sobre los electrones. Entre estos extremos está el enlace covalente polar, en el que los pares de electrones se comparten de manera desigual entre átomos de distintos elementos; ejemplo: el cloruro de hidrógeno (Burns, 1996, pág. 221).

Casi todos los compuestos contienen enlaces covalentes polares; quedan comprendidos entre los extremos de lo covalente no polar y lo iónico puro.



1.7.3.2. La adsorción química

Se debe a fuerzas mucho más potentes como las que conducen a la formación de compuestos químicos mediante enlaces covalentes, por la reacción entre grupos funcionales residuales y radicales libres y moléculas de sustancias afines (Romero Rojas, 2000, pág. 312).

El compuesto adsorbido forma una capa monomolecular sobre la superficie del adsorbente; las moléculas no son libres de moverse de un sitio a otro, cuando toda la superficie del sólido está cubierta por el material adsorbido, la capacidad del adsorbente está prácticamente agotada. La adsorción química no es reversible y para remover el

material adsorbido se debe calentar el adsorbente (Romero Rojas, 2000, pág. 312).

1.7.3.3. La adsorción de intercambio

Se debe a la atracción eléctrica entre el adsorbato y la superficie del adsorbente. Los iones de un contaminante se concentran sobre sitios de carga eléctrica opuesta, sobre la superficie del adsorbente. A mayor carga eléctrica del ión, mayor atracción; así mismo, a menor tamaño del ión, mayor atracción; La mayor parte de los fenómenos de adsorción, se debe a una combinación de las fuerzas mencionadas (Romero Rojas, 2000, pág. 312).

1.8. VARIABLES QUE AFECTAN EL PROCESO DE ADSORCIÓN

En términos generales las variables más importantes que afectan la adsorción son:

- Temperatura
- pH
- Tiempo de contacto
- Tamaño de la partícula

1.8.1. Temperatura

Una mayor temperatura generalmente permite llegar al equilibrio más rápidamente; sin embargo, la cantidad adsorbida de impureza es menor. Esto quiere decir que si el tiempo no fuera importante, se podría lograr una mayor adsorción a menor temperatura; lo cual rara vez es práctico a nivel industrial, por lo que aumentar la temperatura -cuando es posible- normalmente resulta benéfico (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000). Cabe destacar que la elevación de temperatura no es directamente proporcional a la cantidad adsorbida de impurezas.

1.8.2. pH

Muchos compuestos que provocan color, varían su estructura y color al cambiar el pH. En la mayoría de los casos, la decoloración a pH más bajo es más eficiente por dos razones según (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000):

- Los compuestos que generan color normalmente tienen una dependencia alta con el pH, siendo menos intenso a pH menor.
- La adsorción es más eficiente a pH más bajo.

Cuando no se tiene certeza del comportamiento, es mejor no modificar el pH y buscar un carbón activado con pH cercano al proceso.

1.8.3. Tiempo de Contacto

La adsorción es muy rápida al inicio de la operación, pero a medida que el tiempo transcurre, ésta se hace más lenta hasta que cesa cuando se alcanza el punto de equilibrio (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000).

1.8.4. Tamaño de partícula del Carbón

El área del carbón es interna y en consecuencia, el tamaño de la partícula no tiene efecto sobre la capacidad adsorptiva del carbón; sin embargo tiene efecto sobre la velocidad para alcanzar el equilibrio; por ejemplo: en una aplicación determinada, probablemente, se requerirán varias horas de contacto usando carbón granular, para obtener el mismo resultado que se tendría usando carbón pulverizado y 30 minutos de contacto (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000).

Las desventajas de una menor partícula son:

- Con carbones granulares: mayor caída de presión.
- Con carbones pulverizados: menor filtrabilidad

1.9. CARBÓN ACTIVADO

El carbón activado es una sustancia utilizada desde finales de la edad media con fines medicinales; en el siglo XVIII, se empezó a desarrollar aplicaciones industriales.

En la actualidad está ampliamente implantado el empleo de carbón activado en diversos campos de las industrias: azucarera, química, farmacéutica, etc. Además, se está incrementando su uso en el tratamiento de las aguas residuales, el agua para consumo humano y de proceso industrial, debido a que el carbón activo es la sustancia adsorbente por excelencia. Esta capacidad elevada de adsorción de diversas sustancias, junto con la gran facilidad y rapidez de eliminación del medio tratado y la posibilidad de, una vez agotado, ser regenerado para su reutilización, permite un tratamiento eficaz y barato en aplicaciones múltiples, en muchas de las cuales es un producto insustituible. Carbón activado.- es un término genérico usado para denominar a materiales carbonáceos altamente porosos que tienen una gran capacidad de adsorción. Se considera que el carbón activado es un polímero orgánico complejo poseedor de una gran superficie específica y buena conducción eléctrica.

Las propiedades de adsorción que posee el carbón activado, se deben a su gran superficie específica, grado alto de reactividad y al tamaño de los poros que permiten el acceso de moléculas al interior. Los macro poros tienen superficies específicas bajas,

pero sirven como conductos de paso hacia el interior donde se encuentran meso y micro poros, donde realmente se produce la adsorción, por lo que, un carbón activo de calidad excelente, debe presentar una importante micro porosidad, pero además, una meso y macro porosidad suficiente que permitan una difusión rápida al interior de los granos.

1.9.1. Origen del carbón activado

Según (Clarimex, Proceso de Activación, 2000) el carbón puede ser de origen vegetal o mineral; se lo clasifica según su estructura cristalina en: amorfo, grafito y diamante. El carbón es un alótropo porque tiene formas distintas.

El carbón vegetal es una forma alotrópica no cristalina del carbón.

El carbón amorfo es aquel que no tiene una estructura definida y es susceptible de activarse.

El carbón grafito tiene una disposición cristalina que le da la naturaleza resbaladiza del grafito.

El carbón diamante tiene una disposición cristalina que le da la dureza característica del diamante.

El carbón activado puede fabricarse a partir de una gran variedad de materiales, pudiendo ser de orígenes vegetal y mineral.

Carbones minerales como antracitas, hulla bituminosa, lignita y turba.

Carbones vegetales como la madera, la cáscara de nuez, el bagazo de caña de azúcar, el aserrín, las semillas de aceituna, la cáscara de coco, entre otros.

En la figura 6, se puede apreciar, diferentes tipos de materias primas, tales como: madera, coco, carbón mineral, a partir de las cuales, se puede obtener el carbón activado granular.



Figura 6. *Carbón activado y sus diferentes materias primas*
Fuente: Folleto Grupo Clarimex México

1.9.2. Preparación de carbones activados

El material crudo es deshidratado y carbonizado mediante calentamiento lento en ausencia de aire; para evitar la combustión se extrae el agua y convierte en carbón primario. La activación física o química, ensancha y aumenta los poros del carbón, desarrollando una macro estructura porosa de gran área superficial por unidad de masa, que lo convierte en uno de los adsorbentes más usados en el tratamiento de agua.

1.9.3. Procedimiento de activación

El procedimiento de activación consiste básicamente en reordenar los átomos de carbón en anillos tipo benceno, para lograr una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; en otras palabras, la activación consiste en multiplicar la cantidad de poros de un carbón dando como resultado una estructura extremadamente porosa de gran área superficial disponible para llevar a cabo el proceso de adsorción de impurezas que provocan olor, color o sabor indeseable (Clarimex, Proceso de Activación, 2000).

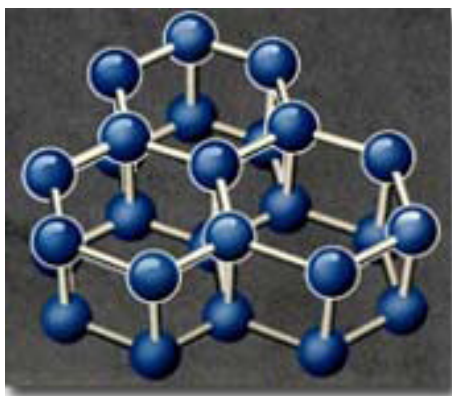


Figura 7. Estructura cristalina reticular anillos tipo benceno
Fuente: Folleto Grupo Clarimex México

Existen básicamente dos procesos a través de los cuales se pueden lograr la activación: físico y químico.

1.9.3.1. Procedimiento físico

Este procedimiento consiste en carbonizar las materias primas llegando al rojo vivo para expulsar los hidrocarburos, pero sin el aire suficiente para mantener la combustión, obteniéndose un carbón primario.

La activación física consiste en oxidar la materia prima a temperaturas altas en presencia de un agente oxidante, usualmente, vapor de agua (Clarimex, Proceso de Activación, 2000). Debido a que la reacción es endotérmica, se debe generar una temperatura constante; normalmente y dependiendo de la materia prima, ésta es de 800°C, dentro de hornos verticales (Miranda & Villamizar, 2006, pág. 3), favoreciendo la aparición de grandes superficies internas. Una vez que el producto está frío, es clasificado según su contextura y uniformidad, siendo posteriormente triturado en molinos y separado según su granulometría. El vapor de agua desarrolla una estructura porosa en el carbón natural.

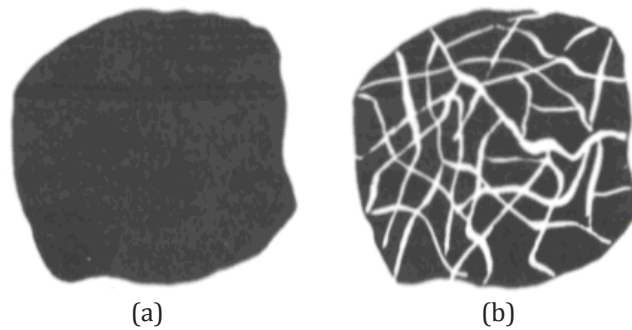


Figura 8. Esquema del carbón activo antes y después de la activación.
(a) Antes de la activación, y (b) Después de la activación
Fuente: Ingeniería de Aguas Residuales (figura 7.5), volumen 1,
Metcalf y Eddy, Mc. Graw-Hill, Interamericana de España, S.A., 1995



Figura 9. Planta de activación de carbón mediante procedimiento físico
Fuente: (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000)

1.9.3.2. Procedimiento químico

La activación química se basa en la deshidratación de la materia prima, mediante sustancias químicas a una temperatura media de 400 a 600°C; ésta depende de la sustancia química a utilizar para activar el carbón (Miranda & Villamizar, 2006, pág. 4).

Los agentes químicos normalmente utilizados son el ácido fosfórico, cloruro de zinc y ácido sulfúrico.

Generalmente este proceso es más aplicado para la activación de carbones vegetales. El agente activador no sólo extrae la humedad, sino que también ayuda a prevenir que la estructura de los poros colapse durante la activación.



Figura 10. *Planta de activación de carbón mediante procedimiento químico*
Fuente: (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000)

1.9.4. Reactivación de carbones activados

La gran ventaja del carbón activado, como adsorbente, descansa en la posibilidad de reactivación una vez utilizado sin pérdida apreciable del poder de adsorción (Huecas Ayala, 2013).

Durante la adsorción física, dada la naturaleza y energía del enlace, las moléculas ligadas a la superficie del carbón pueden ser desorbidas fácilmente con la utilización de vapor de agua a 120 °C.

Durante la adsorción química las moléculas están atrapadas en los poros del carbón, se necesitan energías mucho más elevadas para la eliminación de las impurezas. Usualmente para la reactivación se calienta el carbón agotado hasta 930 °C, aproximadamente, en una atmósfera aire-vapor utilizando hornos rotatorios donde los productos orgánicos adsorbidos se queman y el carbón activo se restaura básicamente hasta su capacidad inicial de adsorción.

1.9.5. Características físico-químicas del carbón activado

1.9.5.1. Composición química

El término carbón activado designa un espectro amplio de materiales que se diferencian fundamentalmente en su estructura interna (distribución de poros y superficie específica) y granulometría. La composición química del carbón activo es aproximadamente un 75 – 80% carbono; 5 – 10% cenizas; 60% oxígeno; y 0,5% hidrógeno (Aguapedia, 2000, pág. 15).

1.9.5.2. Estructura física del carbón activo

El carbón activo posee una estructura microcristalina que recuerda, en cierta medida, a la del grafito. Esta estructura que presenta el carbón activo da lugar a una distribución de tamaños de poro bien determinada normalmente. Se pueden distinguir tres tipos de poros según su radio: macro, meso y micro (Aguapedia, 2000, pág. 15)

Los micro poros tienen un radio de 20 Amstrongs ($A = 10-10m$) o menos y proporcionan más área. Son útiles para adsorber moléculas muy pequeñas, generalmente presentes en las purificaciones de gases.

Los meso poros están en el rango de 20 – 500 Amstrongs y aunque su contribución al área total es menor que los micro poros, su tamaño les permite adsorber moléculas grandes por lo general presentes en las purificaciones de líquidos.

Los macro poros casi no contribuyen al área total de un carbón pero su importancia radica en que actúan como vías de acceso a los meso y micro poros, afectando la velocidad de difusión de las impurezas en el carbón.

En la Figura 11, se aprecian los micros, meso y macro poros de un carbón activado granular.

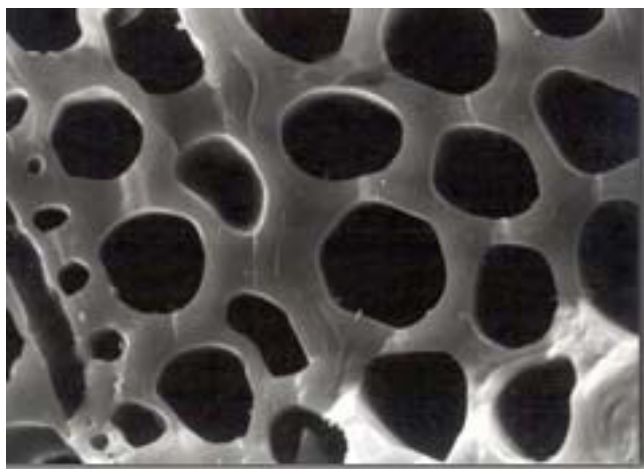


Figura 11. Porosidad del carbón activado
Fuente: (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000)

Desafortunadamente el área total y tamaño de los poros no son fáciles de medir, y en consecuencia se suelen utilizar algunos índices como (Clarimex, Clasificación del carbón activado, 2000):

- El índice de yodo

- El índice de melaza
- El índice de azul de metileno

Estos índices indican la facilidad de adsorción de las moléculas de distintos tamaños, por lo que dan una idea del tipo de poros que tiene un carbón.

Normalmente es difícil que un carbón tenga poros de un solo tamaño; tiene una distribución determinada.

Cuando la media se inclina hacia los micro poros, el carbón es de “fase gaseosa”; en caso contrario, es de “fase líquida”.

Índice de yodo.- es una medida indirecta para determinar el número de micro poros; se basa en la adsorción de yoduro de potasio, que es una micromolécula. Para un buen carbón, el rango va desde 600 a 1.200 mg/g de carbón activado (Clarimex, Purificación en fase líquida, 2000).

Índice de melaza.- es otra medida indirecta para determinar el número de poros medios o meso poros; es un número adimensional, que según un patrón de muestra tiene un valor entre 170 y 200; se basa en la adsorción analizada de melaza por el carbón activado, comparado con un carbón activado patrón.

Índice de azul de metileno.- es otra medida indirecta para determinar el número de macro poros; generalmente, su valor varía desde 5 hasta 25 g/100 g de carbón; se basa en la adsorción de una solución de azul de metileno por 100 g de carbón.

1.9.6. Usos del carbón activado

El carbón activado en las plantas de purificación de agua se utiliza ampliamente para la remoción de color, compuestos productores de olores y sabores, así como de contaminantes orgánicos. En plantas de tratamiento de aguas residuales, se usa como tratamiento terciario, después del tratamiento primario y secundario (biológico convencional), o después del tratamiento físico-químico convencional, para remover sustancias orgánicas disueltas resistentes y mejorar la calidad físico-química del efluente. En general el carbón activado es especialmente útil para la adsorción de compuestos orgánicos disueltos.

En resumen, las aplicaciones más usadas del carbón activado para el tratamiento de las aguas y aguas residuales son las siguientes:

- Remoción de sustancias orgánicas que producen olores y sabores
- Remoción de trihalometanos, pesticidas y compuestos orgánicos de cloro
- Remoción de residuos orgánicos tóxicos o peligrosos

- Remoción de metales pesados

1.9.7. Tipos de carbón

De acuerdo con su tamaño, el carbón activado se clasifica en: carbón en polvo, con diámetro al del tamiz de malla número 200 (abertura de orificio = 0,074 mm = 74 micras), y carbón granular, con diámetro superior a los 0,1 mm.

Para expresar el tamaño de las sustancias sólidas granulares y/o polvos, generalmente se utilizan como referencia, los diferentes tamices utilizados para graduar dichas sustancias según normas internacionales. Al tamizar un material, el tamaño del producto queda determinado por la abertura real de la malla utilizada.

Escala de tamices.- El tamizado es un método de separación de partículas que se basa solamente en la diferencia de tamaño. En el tamizado industrial se vierten los sólidos sobre una superficie perforada o tamiz, que deja pasar las partículas pequeñas, o “finos”, y retiene las de tamaños superiores, o “rechazos”. Un tamiz puede efectuar solamente una separación en dos fracciones. Estas fracciones se llaman fracciones de tamaño no especificado, porque aunque se conoce el límite superior o inferior del tamaño de las partículas que contiene, se desconoce su tamaño real. Es el método más sencillo para la clasificación granulométrica en el laboratorio y consiste en pasar el material sucesivamente por una serie de tamices o cedazos que posean orificios o mallas progresivamente decrecientes. El material que pasó a través de un tamiz y ha sido retenido en el siguiente porque sus orificios son de tamaño menor que el anterior, suele considerarse como detamaño igual a la media aritmética de la abertura de ambos tamices, éste valor representa el “tamaño medio” o diámetro medio y se representa por D_m . El material que no atraviesa los orificios del tamiz se designan como rechazo o fracción positiva, y el que lo pasa se llama tamizado o fracción negativa (Hernandez, 2002).

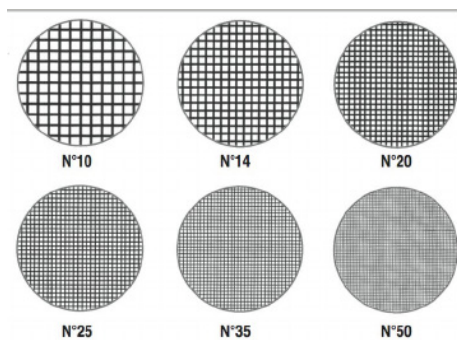


Figura 12. *Varios tipos de tamices*
Fuente: (Hernandez, 2002)

Esta serie internacional tiene de base un tamiz de número de malla 200, abertura de orificio = 0,074 mm = 74 micras.

Tabla 4. Cuadro de Tamices mas utilizados

NÚMERO DE MALLA O TAMIZ	ABERTURA nm
4	4,699
8	2,362
12	1,397
20	0,833
30	0,542
40	0,380
150	0,104
325	0,043

Fuente: (Bonilla, 2005).

1.9.7.1. Carbón activado granular

El carbón activado granular, se acostumbra a denominarlo según su granulometría, pues ésta no es uniforme; se escogen dos números de mallas para expresar su tamaño mayor y menor. Así, en un carbón activado granular 8 x 30, sus gránulos varían desde los retenidos por la malla 30 hasta la malla 8, variando su diámetro equivalente desde 0,542 a 2,36 mm (Romero Rojas, 2000, pag 317).

El carbón activado granular es por lo general, carbón de partículas de tamaño mayor que los huecos de una malla 50; su densidad aparente es de 0,4 a 0,5 g/ cm³; diámetro promedio de las partículas de 1,2 a 1,6 mm; densidad de partículas de 1,4 g/cm³. Se usa tanto en purificación de agua como en el tratamiento de las aguas residuales, con el fin de explotar su gran capacidad adsortiva para remover sustancias orgánicas disueltas y suspendidas. El carbón activado granular es un poco más costoso que el carbón en polvo, pero es más fácil de manejar, más sencilla su regeneración y usado en los procesos de flujo continuo. Este carbón tiene una distribución más uniforme de los micro poros, poros de transición y macro poros. Aunque el 95% del área superficial se debe a los micro poros, la existencia de macro poros y poros de transición, permiten la entrada de moléculas grandes y el acceso del líquido a los micro poros (Romero Rojas, 2000, pag 317).

Entre las características típicas del carbón activado granular, se incluyen las siguientes (norma AWWA B 600 - 74) (Romero Rojas, 2000, pag 317):

- Tamaños comunes: 8 x 16 ; 8 x 30; 10 x 30; 12 x 40; 14 x 40; 20 x 40
- Tamaño efectivo: 0,55 – 1,3 mm.
- Coeficiente de uniformidad: < 2,1
- Humedad: < 8%
- Densidad aparente: > 360 kg/m³
- Resistencia a la abrasión: > 70%
- Número de yodo: > 500 mg/g

Según (Romero Rojas, 2000, pag 317) una especificación típica de un carbón activado para el tratamiento de las aguas residuales es la siguiente:

- Área superficial: 950 – 1.050 m²/g
- Densidad a granel: 480 Kg/m³
- Densidad de las partículas húmedas en el agua: 1,3 – 1,4 g/cm³
- Tamaño efectivo: 0,8 – 0,9 mm
- Coeficiente de uniformidad: ≤ 1,9
- Diámetro promedio de partícula: 1,5 -1,7 mm
- Número de yodo: > 900
- Resistencia a la abrasión: > 70%
- Cenizas: < 8%
- Humedad: < 2%
- % Retenido sobre el tamiz # 8 (2,38 mm): < 8%
- % Retenido sobre el tamiz # 30 (0,59 mm): < 5%

Otras características típicas de carbones activados comerciales se resumen en la tabla 5.

Tabla 5. Características típicas de algunos carbones activados comerciales

PROPIEDAD	CARBÓN EN POLVO	CARBÓN GRANULAR	CARBÓN GRANULAR
	AQUA	Nuchar WVV	Nuchar WVG
Área superficial, m ² /g	-	> 900	> 1100
Tamaño de partícula, μm	8 - 9	8 x 30	12 x 40
Coefficiente de uniformidad	-	< 1,8	< 1,8
Tamaño efectivo, mm	-	0,85 - 1,05	0,55 - 0,75
Densidad aparente, kg/m ²	577 ± 64	560 - 593	433 - 465
Número de yodo, mg/g	800 ± 100	> 850	> 1050
Densidad de partículas, g/cm ³	1,4 - 1,5	1,45 - 1,55	1,30 - 1,40
Análisis granulométrico			
% pasa tamiz 100	99 - 100		
% pasa tamiz 200	97 - 99		
% pasa tamiz 325	92 - 98		

Fuente: Purificación del Agua (cuadro 10.3), Jairo Romero Rojas, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000.

1.9.7.2. Características físicas importantes en un carbón activado granular

- **Área superficial:** generalmente entre 500 - 1.400 m²/g. Es una medida del área disponible para adsorción; se determina midiendo la cantidad de nitrógeno adsorbido por el carbón, mediante un método estándar.
- **Densidad aparente:** es un ensayo usado para valorar el grado de regeneración de un carbón; es la masa por unidad de volumen de carbón activado, homogeneizado mediante vibración en el aparato de medida.
- **Densidad de empaque:** es un valor muy útil para determinar la cantidad másica y volumétrica de carbón requerido; el carbón activado granular tiene densidades de empaque de 250 a 500 kg/m³.
- **Tamaño efectivo, coeficiente de uniformidad y diámetro promedio de partículas:** son características importantes para evaluar la pérdida de energía a través de los lechos de carbón

- **Volumen de poros:** valor útil para seleccionar un carbón. Es una medida del volumen de macro y micro poros dentro de las partículas del carbón, que se expresa en cm^3/g .
- **Análisis granulométrico:** útil para evaluar el cumplimiento de las especificaciones del material y los efectos del manejo del carbón en la propia planta. La tasa de adsorción y pérdida de energía aumentan a medida que disminuye el tamaño de las partículas
- **Número de yodo:** correlaciona la habilidad del carbón para adsorber sustancias de masa molecular baja y determinar la recuperación de la capacidad adsorptiva con la regeneración. Es el número de yodo adsorbido en miligramos por un gramo de carbón activado, para una concentración 0,02 Normal de yodo de equilibrio en el filtrado. Se usa para medir el volumen existente en poros de 10 a 28 Amstrongs de diámetro. Los carbones con porcentajes altos de poros de este tamaño son apropiados para la adsorción de sustancias de masa molecular baja.
- **Número de miel:** valor de miel e índice de decoloración de miel sirven para evaluar la habilidad del carbón activado para adsorber. Se usan para cuantificar el volumen existente en poros mayores de 28 Amstrongs de diámetro. Los carbones con porcentajes altos de poros de este tamaño son adecuados para adsorber sustancias de masa molecular alta.

1.9.7.3. Carbón activado en polvo

En plantas de purificación de agua, el carbón activado en polvo, las partículas de tamaño menor que los huecos de una malla 50, el diámetro promedio de partículas menor de 0,1 mm, el área superficial de 500 a 600 m^2/g y la densidad aparente de 0,3 a 0,75 g/cm^3 , se han usado bastante para el control de olores y sabores causados principalmente según (Romero Rojas, 2000, pag 315 - 317) por:

- Gases disueltos como el ácido sulfídrico y metano.
- Materia orgánica proveniente de algas, microorganismos, maleza, hierba u hojas en descomposición.
- Fenoles, cresoles y otros contaminantes orgánicos.
- Residuales altos de cloro combinado.
- Detergentes.
- Compuestos químicos agrícolas como los pesticidas.

El carbón activado en polvo puede aplicarse en casi cualquier lugar antes de la filtración, pero el sitio óptimo de aplicación debe seleccionarse de acuerdo con la secuencia

de los otros procesos de tratamiento (Romero Rojas, 2000, pag 315 - 317). Al seleccionar los puntos de aplicación del carbón activado en polvo, se deben tener en cuenta los siguientes hechos de importancia:

- El carbón activado funciona mejor a valores bajos de pH.
- El tiempo de contacto del carbón depende tanto de su aplicación al comienzo de los procesos de tratamiento como la habilidad del carbón para permanecer en suspensión y circulación.
- La superficie activa del carbón debe preservarse, previniendo su revestimiento, tapado o sellado por agentes químicos, especialmente por los coagulantes.

La aplicación del carbón activado en polvo, antes de la coagulación, se recomienda en los siguientes casos según (Romero Rojas, 2000, pag 315 - 317):

- Ocurrencia frecuente de olores y sabores.
- Descomposición, dentro de la planta de materiales que pueden causar olores y sabores.
- Olores y sabores severos que requieren dosis grandes de carbón.
- En resumen, el carbón activado en polvo será útil para remover olores y sabores después de otros tratamientos. La localización de los puntos de aplicación dependerá de cada problema específico y tipo de planta de purificación, pero debe permitirse un tiempo de contacto lo más prolongado posible, antes de la filtración.

Las siguientes son características típicas del carbón activado en polvo según la norma AWWA B600 – 66:

- Valor de fenol: < 30
- Humedad: < 8%
- Finura:
 - pasa malla 100 > 99%
 - pasa malla 200 > 95%
 - pasa malla 325 > 90%

1.9.8. Capacidad de adsorción de un carbón

La capacidad de adsorción es función del área superficial total del sólido usado como adsorbente, ya que cuando mayor sea esta superficie, se dispone de mayor número de fuerzas residuales no equilibradas para la adsorción.

1.9.9. Isotermas de adsorción

La capacidad teórica de adsorción de un contaminante determinado por medio del carbón activado, se puede determinar, calculando su isoterma de adsorción.

La cantidad de adsorbato que puede retener un adsorbente es función de las características y la concentración del adsorbato, y la temperatura. En general, la cantidad de materia adsorbida, se determina como función de la concentración a temperatura constante; y la función resultante, se conoce con el nombre de isoterma de adsorción. Las relaciones de equilibrio entre adsorbente y adsorbato, se describen mediante las isotermas de adsorción.

1.9.10. Clases de isotermas de adsorción

Las fórmulas más frecuentemente empleadas para el tratamiento de los datos experimentales de la isoterma fueron desarrolladas por Freundlich, Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller (Isoterma BET).

1.9.10.1. Isoterma de Langmuir

La ecuación de Langmuir se basa en un equilibrio entre la condensación y evaporación de las moléculas adsorbidas, considerando un estrato monomolecular de adsorción (Metcalf & Eddy, 1995).

La Isoterma de Langmuir, se define así:

$$X/m = abC_E / 1 + aC_E$$

Donde:

X/m = cantidad adsorbida por masa unitaria de adsorbente.

a, b = constantes empíricas.

C_E = concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción, densidad.

Esta ecuación puede ser expresada en forma lineal:

$$1/X/m = 1/b + 1/abC_E$$

Puesto que un agua residual contiene más de una sustancia que puede ser adsorbida, la aplicación directa de la ecuación de Langmuir no es posible.

1.9.10.2. Isoterma de adsorción BET

El modelo BET supone que las capas de moléculas, se adsorben en la parte superior de moléculas previamente adsorbidas. Cada capa se adsorbe de acuerdo con el modelo de Langmuir (Ramalho R. , 2003, pág. 589). La isoterma BET se expresa mediante la ecuación:

$$X/m = bkC_E / (C_S - C_E) [1 + (k - 1) C_E / C_S]$$

La constante b tiene el mismo significado que en la isoterma de Langmuir y k es una constante que se relaciona con la energía de adsorción. Cs es la concentración de soluto a saturación en todas las capas. La representación de los datos isotérmicos, siguiendo el modelo BET, conduce a una curva en forma de S (Ramalho R. , 2003, pág. 589).

La ecuación de la isoterma BET, puede reagruparse en forma lineal como sigue:

$$C_E / (C_S - C_E) (X/m) = 1/kb + (k - 1 / (kb)) (C_E / C_S)$$

La representación de esta ecuación es una línea recta.

1.9.10.3. Isoterma de Freundlich

Derivada a partir de consideraciones empíricas, relaciona matemáticamente la concentración residual en la solución con la adsorbida, a una temperatura y condiciones específicas según (Romero Rojas, 2000):

$$q = X/m = KC^{1/n}$$

Donde:

- q = masa adsorbida de contaminante por unidad de masa de adsorbente.
- X = cantidad adsorbida de sustancia igual a la diferencia entre la concentración del afluente Co, y la concentración del efluente C, es decir: (Co - C).
- m = masa del carbón activado.
- K = constante para cada soluto y temperatura
- C = concentración residual del soluto después de la adsorción.
- n = constante para cada soluto y temperatura (n >1).

La isoterma de adsorción es una ecuación de equilibrio y se aplica para dicha condi-

ción; es decir, para un tiempo suficiente de contacto entre el adsorbente y adsorbato para alcanzar el equilibrio (Romero Rojas, 2000).

De acuerdo con la ecuación anterior, en forma logarítmica, la isoterma de Freundlich se puede escribir:

$$\log q = \log(X/m) = \log K + (1/n)\log C$$

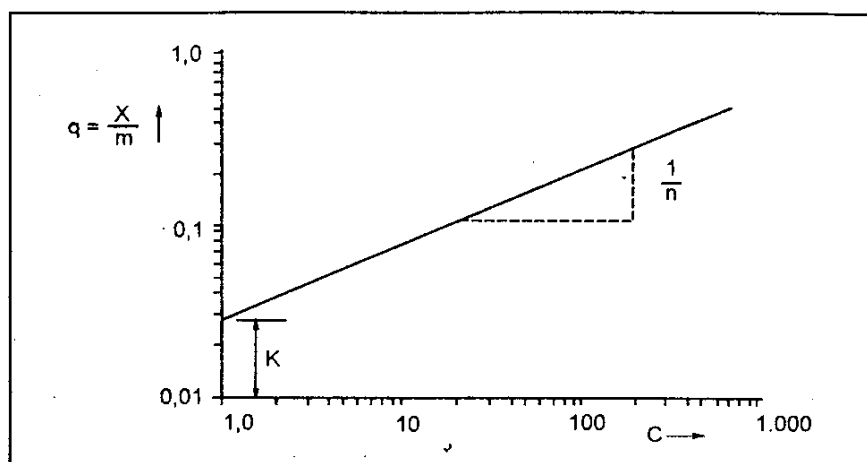


Figura 13. Representación gráfica de la Isoterma de Freundlich
Fuente: Purificación del Agua, Jairo Romero Rojas, Editorial
Escuela Colombiana de Ingeniería, 2000

Por tanto, el gráfico Log - Log, q contra C , es una recta y permite presentar fácilmente los datos experimentales de adsorción para determinar los valores de las constantes k y n . La pendiente de la recta es igual a $1/n$ y el valor de k , se obtiene para $C = 1,0$. El valor de k es indicador de la capacidad de adsorción y la pendiente $1/n$ de la intensidad de adsorción. Valores típicos de k y n , se encuentran en la literatura, para algunas aguas y diferentes isotermas de carbón. En resumen, la isoterma de adsorción de Freundlich es un gráfico de la cantidad de componente adsorbido por unidad de adsorbente contra la concentración de dicho componente para equilibrio y a temperatura constante (Romero Rojas, 2000).

De la isoterma de adsorción, se puede determinar si es factible, un valor particular de remoción mediante adsorción, la capacidad del carbón para el propósito propuesto, y la dosificación requerida de carbón. Así mismo, los ensayos de las isotermas permiten estudiar los efectos de los factores como el pH y la temperatura sobre la adsorción y comparar los distintos carbones disponibles (Romero Rojas, 2000).

1.9.10.4. Capacidad teórica de adsorción de un carbón basada en los datos de la isoterma

La capacidad de adsorción de un carbón determinado se puede estimar de los datos de la isoterma. A partir del gráfico, la capacidad de adsorción del carbón, se puede determinar prolongando la isoterma hasta la intersección con una línea vertical trazada por el punto correspondiente a la concentración inicial C_0 . El valor de (x/m) , C_0 , correspondiente a este punto, se lee en el eje de la ordenada del gráfico. Este valor de (x/m) , C_0 , representa la cantidad de materia adsorbida por unidad de peso de carbón activado una vez alcanzado el punto de equilibrio con la concentración inicial del constituyente. Esta condición, se debe cumplir en la parte superior de un lecho de carbón correspondiente a un tratamiento en columna de contacto, por lo que representa la capacidad última de adsorción del carbón para un constituyente determinado.

La figura 14 representa una isoterma típica de decoloración, de la figura 7-9 del libro Ingeniería de Aguas Residuales, Metcalf y Eddy, volumen 1, 1995.

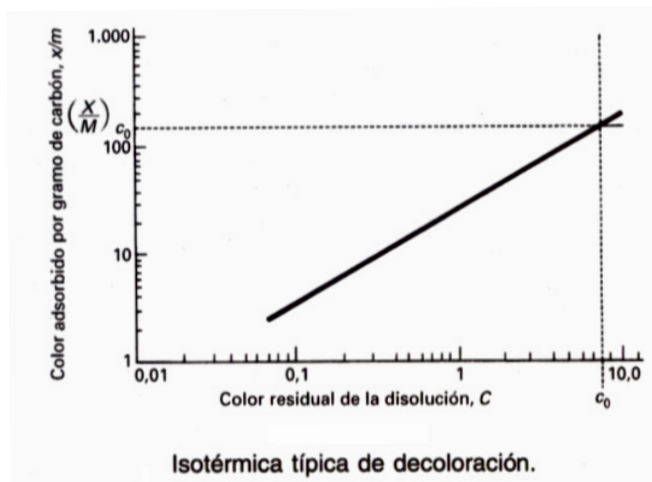


Figura 14. *Isotérmica típica de decoloración*
Fuente: Ingeniería de Aguas Residuales (Figura 7-9),
Metcalf y Eddy, Volumen 1, 1995.

1.9.10.5. Capacidad de agotamiento de adsorción

En las aplicaciones, la capacidad de agotamiento de la adsorción de una columna de contacto de carbón activado granular, a escala real, $(x/m)_r$, es un porcentaje de la capacidad teórica de adsorción obtenida a partir de la isoterma. Se puede asumir como valor de la capacidad de adsorción de agotamiento, un valor aproximado entre el 25 y el 50 por 100 de la capacidad teórica de adsorción (x/m) o, una vez determinado el valor de $(x/m)_r$; el tiempo hasta el agotamiento (Metcalf & Eddy, 1995), se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$(x/m)_r = X_b/M_c = Q(C_1 - C_b/2)(t_r/M_c)$$

Ecuación para la adsorción del material orgánico en una columna de carbón activado granular.

Donde:

$(x/m)_r$ = capacidad real de adsorción, g/g

X_b = masa de material orgánico adsorbido en la columna de carbón activado granular al producirse el agotamiento, g.

M_c = masa de carbón contenido en la columna, g

Q = caudal, m³/d

C_i = concentración de materia orgánica a la entrada de la columna, mg/l

C_b = concentración de materia orgánica al producirse el agotamiento, mg/l.

t_b = tiempo hasta el agotamiento, d.

$$t_b = (x/m)_b M_c / Q[C_1 - (C_b/2)]$$

1.9.11. Curva típica de ruptura para la adsorción en un proceso continuo

Cuando el agua residual fluye a través de una columna de carbón activado, los contaminantes se separan gradualmente, y el agua residual se purifica progresivamente conforme desciende a través de la columna. No hay una demarcación neta entre el agua purificada y la alimentación. En lugar de ello, se forma una zona de transición, en la cual, la concentración del contaminante varía desde un máximo al final de la zona, hasta prácticamente cero en la parte inicial de la misma. Esta zona es la porción activa de la columna denominada zona de adsorción. El movimiento progresivo de esta zona de adsorción puede verse mediante la representación de las curvas denominadas de ruptura, como la representada en la Figura 15, en la cual las ordenadas de la curva de ruptura corresponden a la concentración del efluente, en mg/l de DQO, y las abscisas corresponden a la duración del flujo a través de la columna; por ejemplo: días. Con frecuencia las abscisas se expresan también en función de los volúmenes de lecho de flujo total (Ramalho, 2003).

Normalmente la operación de una columna de adsorción no se lleva hasta agotamiento. En el caso de la Figura 15, puede por ejemplo, decidirse parar la operación cuando la concentración del efluente alcanza un valor $C_E = 10$ mg DQO/l. Esta concentración C_E , se denomina concentración de ruptura. Lógicamente, no sería económico enviar el carbón de la columna a regeneración en el momento en que la concentración del efluente alcanza los 10 mg DQO/l, muy lejos del agotamiento de la columna. Por esta razón se utilizan varias columnas operando en serie, de forma que el efluente de una columna constituye la alimentación de la siguiente (Ramalho, 2003).

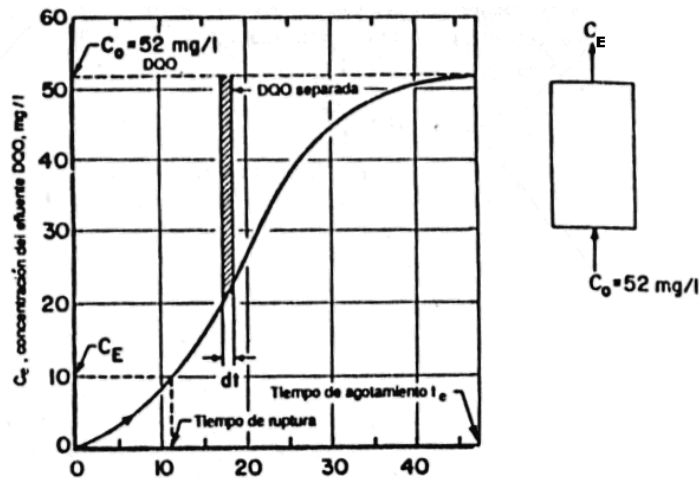


Figura 15. Curva típica de ruptura para adsorción con carbón activado
Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales (Fig. 8.4), R. S. Ramalho,
Editorial Reverté, S.A., 1996.

1.9.12. Zona de transferencia de masa

La zona del carbón activado en donde se produce la adsorción recibe el nombre de zona de transferencia de masa (ZTM). Una vez que el agua contaminada haya circulado a través de una región del lecho de carbón cuya profundidad sea igual a la ZTM, la concentración del contaminante se habrá reducido a su valor mínimo. La adsorción no se producirá por debajo de ese nivel. Conforme se vayan saturando los estratos superiores de carbón granulado, la ZTM, se irá desplazando hacia abajo hasta el agotamiento. Para que la ZTM se desarrolle por completo, dentro del lecho de carbón activado, es necesario que transcurra un cierto tiempo mínimo de contacto sin lecho. Si el tiempo de contacto de la columna sin lecho es demasiado corto (es decir, la carga hidráulica es demasiado elevada), la longitud de la ZTM será mayor que la profundidad del lecho de carbón activado, y no se conseguirá eliminar todo el contaminante adsorbible (Metcalf & Eddy, 1995).

El grosor de la ZTM varía en función del caudal que circula por la columna debido a que los fenómenos de dispersión, difusión y formación de canales preferenciales en el medio granular dependen directamente del caudal. El único procedimiento que

permite aprovechar la capacidad de adsorción en la zona inferior de la columna, consiste en la conexión en serie de dos columnas, habilitando la segunda al agotarse la capacidad adsorbente de la primera, o la conexión de múltiples columnas en paralelo (Metcalf & Eddy, 1995).

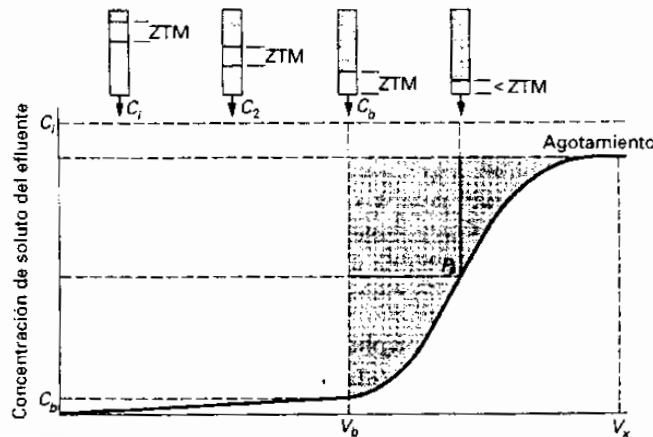


Figura 16. Curva típica de ruptura para el carbón activado, en la que se muestra la zona de transferencia de masa (ZTM) en relación con el volumen de agua tratada
Fuente: Ingeniería de Aguas Residuales (figura 7-8), Metcalf y Eddy, volumen 1, 1995.

1.9.13. Diseño de las columnas de adsorción de laboratorio con carbón activado

El diseño está basado en la ecuación planteada por Bohart y Adams, según el siguiente procedimiento:

A una columna de adsorción, se alimenta el agua residual con una concentración de soluto C_0 (mg/l), se desea reducir esta concentración hasta un valor C_E (mg/l) que generalmente está dada por una norma de calidad de agua, para lo cual se demora un tiempo t , tiempo de servicio, siendo D (m) la profundidad del lecho utilizado.

Bohart y Adams desarrollaron una ecuación para evaluar el funcionamiento continuo de las columnas de carbón activado, basándose en la teoría de la velocidad de reacción sobre una superficie "surface reaction rate theory" (Ramalho, 2003).

$$\ln[(C_0/C_E)-1] = \ln [e^{(KN_0D/v)}-1] - KC_0 t$$

Donde:

- No = capacidad de adsorción, Kg soluto/m³ carbón
- k = constante de velocidad, l solución/(g carbón) (h)
- v = velocidad lineal, m/h.
- C_o = concentración inicial de soluto, mg/l
- C_E = concentración de equilibrio o final, mg/l
- D = profundidad del lecho utilizado, m
- t = tiempo de servicio, h

Puesto que $e^{(KN_0D/v)}$ es mucho mayor que 1a unidad, la ecuación quedaría:

$$\ln[(C_o/C_E)-1] = \ln [e^{(KN_0D/v)}] - KC_o t \quad (\text{Ramalho, 2003, pag 593})\text{-Ec:8.12}$$

$$\ln[(C_o/C_E)-1] = (KN_0D/v) - KC_o t$$

$$KC_o t = (KN_0D/v) - \ln[(C_o/C_E)-1]$$

$$t = (N_0D/C_o v) - \ln[(C_o/C_E)-1] / KC_o \quad (\text{Ramalho, 2003, pag 594})\text{-Ec:8.14}$$

Graficando el tiempo de servicio t, vs la profundidad de lecho D, la representación de la ecuación es una línea recta de la forma $y = m x + b$.

$$\begin{aligned} \text{Pendiente } s &= N_0/C_o v \quad (\text{Ramalho, 2003, pag 395})\text{-Ec:8.15} \\ N_0 &= sC_o v \end{aligned}$$

$$\text{Intercepto } i = - \ln[(C_o/C_E)-1] / KC_o \quad (\text{Ramalho, 2003, pag 595})$$

Donde,

$$K = - \ln[(C_o/C_E)-1] / iC_o$$

A partir de la ecuación (Ramalho, 2003, pag 594)-Ec:8.14, se desarrolla una ecuación para calcular D_o(altura crítica del lecho), que es la profundidad teórica de carbón suficiente para evitar que la concentración del soluto en el efluente exceda el valor C_E. Al tiempo t = 0, el valor de D, se transforma en D_o, dando como resultado:

$$\begin{aligned} D_o &= \text{altura crítica del lecho} \\ t = 0 \quad D &= D_o \end{aligned}$$

Tratamiento de aguas residuales
de textilera utilizando carbón activado

$$0 = N_o D_o / C_o v - \ln[(C_o / C_E) - 1] / K C_o$$

$$N_o D_o / C_o v = \ln[(C_o / C_E) - 1] / K C_o$$

$$D_o = [\ln[(C_o / C_E) - 1] / K C_o] [C_o v / N_o]$$

$$D_o = [v / K N_o] [\ln[(C_o / C_E) - 1]]$$

CAPÍTULO II

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN



2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS DE ADSORCIÓN

2.1. ANTECEDENTES

De acuerdo a muchos autores, entre ellos Ramalho, han llegado a la conclusión que la única forma segura de diseñar un sistema de adsorción con carbón activado es realizando ensayos a escalas de laboratorio ("Batch" y/o continuo), bajo condiciones similares a los de la operación en escala real, lo cual permite determinar las dimensiones y el número de columnas necesarias para conseguir un tratamiento continuo, así como conocer los valores óptimos del caudal, la profundidad de la columna y la capacidad operativa del carbón activado.

Del ensayo en las columnas de laboratorio, se obtendrán algunos resultados que serán expresados en curvas de saturación, en los que se comparan la concentración del contaminante en el efluente frente al tiempo de tratamiento, y/o caudales tratados.

2.2. RAZONES PARA CONSTRUIR COLUMNAS PARA ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Los propósitos para los cuales se diseñan y construyen columnas para adsorción de carbón activado son, generalmente los siguientes:

- Selección del tipo de carbón.
- Determinación de la carga hidráulica.
- Determinación del tiempo mínimo de contacto requerido para producir la calidad deseada de efluente. Este parámetro es uno de los factores más importantes de diseño y es igual al volumen del lecho vacío dividido por el caudal.
- Determinación de la profundidad del lecho.
- Determinación de la pérdida de energía.
- Determinación de la tasa de lavado para el lecho de carbón.
- Determinación de la capacidad total de remoción y necesidad de regeneración.
- Determinación de las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de flujo.

2.3. PARÁMETROS UTILIZADOS DE DISEÑO

Como se estableció en los antecedentes, la única forma segura de diseñar un sistema de adsorción con carbón es ensayar en columnas de laboratorio y/o piloto, para lo cual algunos autores y manuales han establecido condiciones y dimensiones, tanto como para columnas piloto y de laboratorio. A continuación, se mencionan las más

conocidas:

Según (Vanderbilt University, 1976) las condiciones de diseño propuestas, en la página H-6 son las siguientes:

- Se debe operar con cuatro columnas de carbón con profundidades comprendidas entre 0,6 a 1,2 m, en cada columna.
- La carga hidráulica puede estar comprendida entre 40,72 a 407,2 l/min, m².
- Las columnas de laboratorio pueden ser, desde 2,54 cm de diámetro, y las columnas piloto de 12,7 cm de diámetro.

Ramalho, en la página N^o 595, figura N^o 8-6, de su libro "Tratamiento de Aguas Residuales", propone tres columnas de laboratorio con las siguientes dimensiones:

Diámetro = 2,54 cm.

D = Profundidad del lecho entre 0,76 y 1,52 m.

(Wesley Eckenferder, 2000) en su libro "Industrial Water Pollution Control", figura 8-5 página N^o 426, propone tres columnas de las siguientes dimensiones:

Diámetro: 5,08 cm.

D = Profundidad del lecho 0,91 cm.

Según Urso Servicios Medio Ambientales Sevilla – España, estas columnas deben tener unas dimensiones mínimas de 60 cm de altura de carbón activado y 4 cm. de diámetro interno y pueden estar fabricadas en cristal, plástico, fibra de vidrio o metal.

2.4. CONSTRUCCIÓN DE COLUMNAS DE LABORATORIO BASÁNDOSE EN LOS PARÁMETROS DE DISEÑO

Considerando los parámetros sugeridos en el numeral 2.3; por distintos autores, y con base a la disponibilidad de materiales y el grado de dificultad de construcción de las columnas, se decidió por dimensiones que estén dentro de los parámetros recomendados, siendo las siguientes:

Número de columnas: 4

Diámetro de las columnas: 5 cm

Altura de las cuatro columnas: 1 m

Material de las columnas: acrílico

Espesor de las columnas: 4 mm

Profundidades de carbón de: 60, 70, y 80 cm, en cada columna

Cargas volumétricas: 30, 45 y 60 l/h
Cargas hidráulicas: 255, 382 y 510 l/min, m²

2.5. DIAGRAMA DEL EQUIPO



Figura 17. Columna de adsorción con carbón activado granular.
Fuente: Autoría propia.

El equipo de adsorción con carbón activado granular, consta de los siguientes componentes fundamentales:

- Cuatro columnas de acrílico de 5 cm de diámetro, con una altura de 1 m, cada una, con bridas en sus extremos para su fácil instalación.
- Un tanque de plástico de 55 galones, usado como reservorio del agua residual a tratar.
- Una bomba centrífuga de ½ Hp, usada para la impulsión del agua residual, desde el tanque de almacenamiento, a través de los lechos de carbón.
- Un filtro de cartucho para la retención de sólidos en suspensión del agua residual.
- Una botonera de mando para el control del encendido de la bomba.
- Un rotámetro con escala de 0 a 62,5 l/h.
- Distintos accesorios como: válvulas, codos, nudos, neplos, etc.

2.6. INSTRUMENTOS Y ACCESORIOS ADICIONALES DE CONTROL

El instrumento de control básico del equipo es el rotámetro, para el control del flujo de alimentación del agua residual a la unidad.

Las especificaciones técnicas del rotámetro son:

- Escala: 0 – 62,5 l/h.
- Material: vidrio
- Flotador de acero inoxidable



Figura 18. *Rotámetro.*
Fuente: Autoría propia.

ACCESORIOS:

Los accesorios más importantes: bomba, arrancador, válvula de aguja, tanque de almacenamiento del agua residual.

Las especificaciones técnicas de los accesorios son las siguientes:

Bomba centrífuga:

- Uso: Bombeo de agua residual a columnas de carbón activado
- Hp: 0,5
- Voltaje: 110 v
- Material: hierro
- R.P.M. 1.750



Figura 19. *Bomba.*
Fuente: Autoría propia.

Botonera de mando:

- Uso: para el control del encendido de la bomba centrífuga
- Tipo: marcha – paro con selector



Figura 20. *Botonera de mando.*
Fuente: Autoría propia.

Válvula de aguja:

- Uso: regula el ingreso del agua residual al rotámetro
- Diámetro: $\frac{1}{4}$ pulgada
- Material: acero inoxidable



Figura 21. *Válvula de aguja.*
Fuente: Autoría propia.

Tanque de almacenamiento de agua residual:

- Material: plástico
- Capacidad: 55 gal.



Figura 22. *Tanque de almacenamiento*
Fuente: Autoría propia.

Filtro:

- Uso: retención de sólidos en suspensión
- Tipo: cartucho de hilo N° WFC-T5
- Marca: Racor
- Modelo: N° WFA12-T5



Figura 23. *Filtro*
Fuente: Autoría propia.

2.7. ESPECIFICACIONES DEL CARBÓN ACTIVADO GRANULAR UTILIZADO

El producto principal que se va a utilizar para el tratamiento del agua residual de la industria textilera es el carbón activado granular, existiendo en el mercado una gran variedad de marcas, con diferentes características, pero como la investigación es extensa, se la realizó con un tipo de carbón, decidiéndose utilizar el carbón Darco 12 x 20 por su disponibilidad en el mercado y excelente capacidad de adsorción en el tratamiento de aguas residuales, tal como lo certifica su respectiva hoja técnica (DICA, 2000).

HOJA TÉCNICA DEL CARBÓN ACTIVADO DARCO

Marca: Darco 12 x 20

Producido por: NORIT América Inc.

CARACTERÍSTICAS

Darco 12 x 20 es un carbón activado granular lavado con ácido; producido por la activación de vapor a partir de carbón de lignito. Este carbón activado es específicamente manufacturado para aplicaciones que requieren una razón rápida de adsorción en

columnas de presión. Es un carbón activado usado en una variedad de aplicaciones incluyendo purificación de refinados químicos y alimentos.

DARCO 12 x 20 es utilizado frecuentemente para purificación de agua por su eficiencia alta en la declorinación y capacidad excelente de adsorción para sabor, olor y color. Es autentico certificado y puede encontrarse en la norma ANSI/NSF Standard 61.

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Eficiencia de decoloración de la melaza	85 min.
Humedad, como paquete, %	12 max.
Tamaño de malla:	
Mayor que malla 10 (2 mm), %	3 max.
Mayor que malla 12 (1,7 mm), %	10 max.
Menor que malla 20 (0,85 mm), %	5 max.
Ceniza (polvo), %	0,40 max.

PROPIEDADES TÍPICAS

Valor de tanino, mg/l	160
Número de yodo, mg/g	600
pH, agua extraída	4,4
Densidad aparente g/ml	0,37
Lb/ft ³	23
Densidad de la cama, retrolavado y drenaje, lb/ft ³	21
Área superficial, m ² /g	650
Volumen total de los poros, ml/g	0,95
Tamaño efectivo, mm	0,7
Diámetro medio de la partícula, mm	1,3
Coefficiente de uniformidad	1,6
Food Chemical Codex	pasa

EMPAQUETADO Y TRANSPORTACIÓN

El empaquetado estándar es en saco de 40 lb; 30 sacos por “palet”, con una masa de 1.200 lb.

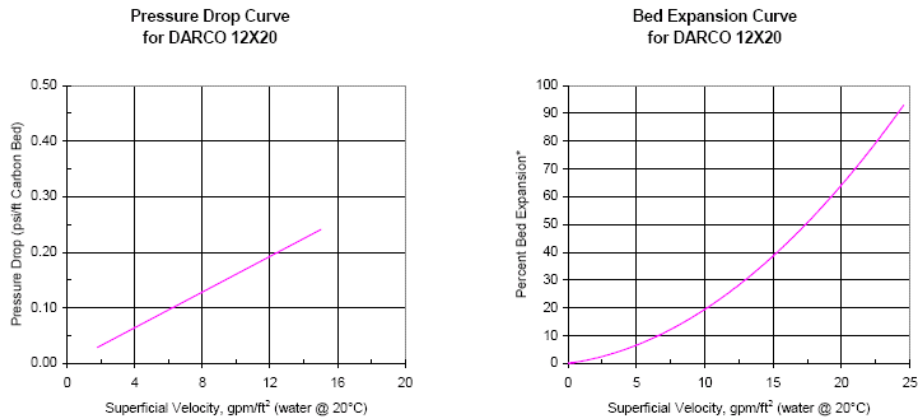


Figura 24. Filtro
Fuente: (DICA, 2000).

2.8. PROCESO DE OPERACIÓN DE LAS COLUMNAS DE LABORATORIO

Los pasos para la operación del equipo son los siguientes:

1. Instalar el carbón activado granulado en las columnas, hasta la altura seleccionada para las pruebas.
2. Hacer una prueba en blanco con agua potable, a fin de que todo el equipo y los accesorios funcionen eficientemente.
3. Colocar el agua residual seleccionada en el tanque de alimentación.
4. Prender la bomba y alimentar el agua residual a las columnas, para lo cual se fija en el rotámetro, mediante la válvula de aguja, el flujo preseleccionado.
5. Tomar una muestra de agua residual, a fin de realizar la caracterización inicial respectiva.
6. Colocar al final de la última columna, un recipiente para recoger el agua tratada.
7. Tomar cada 30 minutos o cada hora una muestra de un litro, de cada columna de carbón para determinar los parámetros de control elegidos, como por ejemplo: DQO, color, turbiedad, pH, temperatura, etc.
8. Terminar la experimentación cuando el carbón activado se encuentra saturado. Esto deberá ser comprobado con las pruebas respectivas de laboratorio, que fue la determinación del DQO. Pero como se necesita, cuando se está realizando el experimento, un parámetro que de un indicio de saturación del carbón, se toma muestras que salen de las columnas de carbón y realiza una prueba visual donde se aprecia que la turbiedad y el color del agua residual de alimentación es aproximadamente igual al agua que sale de las columnas, lo que indica que el carbón ya no está realizando alguna función y estaría saturado.

9. Apagar la bomba, desalojar el agua, sacar el carbón usado de las columnas; finalmente lavar el equipo con agua potable.
10. Para realizar una nueva experimentación, empezar la secuencia con el numeral 1.

CAPÍTULO III

EXPERIMENTACIÓN



3. EXPERIMENTACIÓN

3.1. EFLUENTE INDUSTRIAL UTILIZADO PARA LA EXPERIMENTACIÓN

Para la realización de la experimentación se eligió un efluente industrial proveniente de una industria textil, que es considerada una de las mayores consumidoras y contaminadoras, que emplea en su proceso, una gran variedad de compuestos químicos que generan vertimientos principalmente líquidos. Los residuos textiles son generalmente coloreados, muy alcalinos, con DBO elevada, muchos sólidos en suspensión, con temperaturas elevadas. Las plantas de tratamiento biológico de esta agua residual, generalmente no realizan un tratamiento completo, haciéndose necesario un tratamiento avanzado, como es el de adsorción a través de carbón activado, para eliminar color y DQO residual, disminuyendo la carga contaminante y asegurando que el agua descargada cumpla con las normas establecidas de descarga, pudiendo prever la posibilidad de recircular el agua tratada al proceso de fabricación (Bonilla, 2005).

La industria escogida se dedica a la producción de tela camiseta y tela de hilo usando como materia prima poliéster y algodón.

El agua residual producida es previamente sometida a un tratamiento convencional y luego descargada al alcantarillado público.

A continuación, se presenta un diagrama de flujo del proceso de producción:

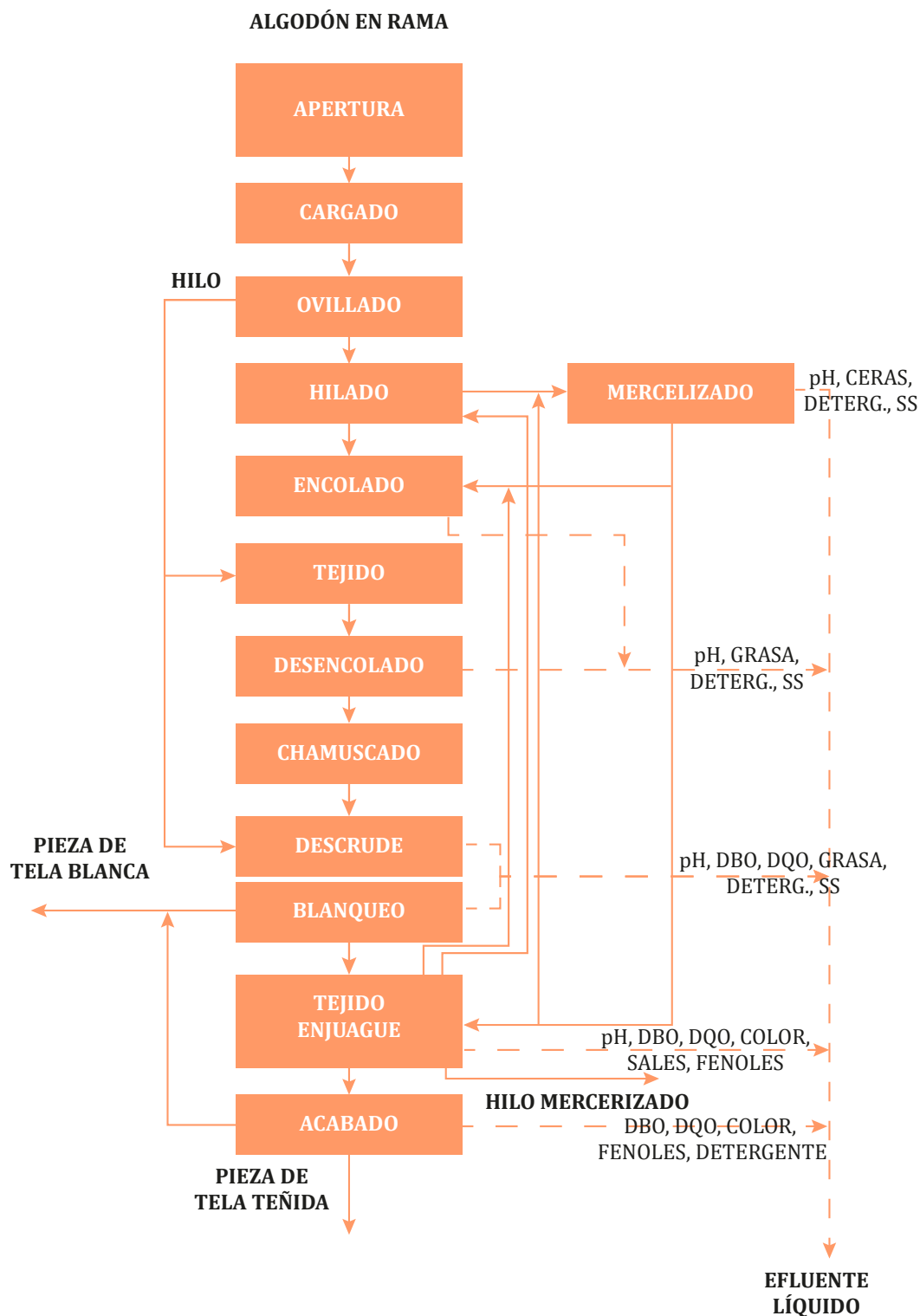


Figura 25. Diagrama de Flujo del Procesos de producción de contaminantes de la industria textil
Fuente: Autoría propia.

3.1.1. Descripción del proceso de producción

Esta industria textil utiliza como materia prima poliéster y algodón, que son almacenados en sus respectivas bodegas. Se inicia el proceso tratando la fibra de algodón en las etapas de cardado – peinado, hilandería y ovillado.

Cardado – peinado.- las pacas de algodón se abren, toman las fibras en forma aleatoria y mezclan; neumáticamente se transportan a las cardas donde se paralelizan las fibras, produciéndose su limpieza y mezcla. El velo, así obtenido en algunos casos, es peinado sucesivas veces, según la calidad que se desee obtener. En estas operaciones secas se eliminan cascarillas, fibras cortas y demás impurezas. De las operaciones de cardado o peinado se obtiene una mecha de fibras que es enrollada u ovillada.

Hilado.- se reduce la mecha cardada al grado de finura conveniente, dándole la tensión y torsión necesarias para una resistencia y finura específicas. El hilo, se enrolla bajo diferentes formas, carretes, bobinas cilíndricas o cónicas, que pueden ser teñidos o enviados al sector de tejeduría.

Teñido de hilado.- los carretes o bobinas de hilado, se someten a un tratamiento con soluciones de soda cáustica y detergentes en máquinas a presión, que elimina completamente las impurezas naturales de algodón (ceras, pectinas, etc.). Tras el enjuague en la misma máquina, las bobinas se tiñen utilizando diferentes colorantes y auxiliares en función del color y la fibra a procesar. El hilado así teñido va directamente al proceso de tejido. En el teñido se producen descargas líquidas alcalinas con una mediana carga orgánica (DQO, DBO), color y detergentes.

Engomado o encolado.- los hilos crudos teñidos empleados como urdiembre llegan en rollos a las unidades de engomado, pasan por una solución de goma defécula hervida (almidón) u otros agentes encolantes (carboximetilcelulosa, alcohol polivinílico y acrilatos) para darle la resistencia necesaria al tejido subsecuente. Los desechos líquidos están constituidos por agua de lavado de los recipientes donde se preparan las soluciones de almidón u otros agentes de engomado y las descargas de las engomadoras. Estos desagües, en general de volumen bajo, se caracterizan por tener una elevada carga orgánica y sólidos en suspensión.

Tejido.- los hilos pueden tejerse en telares a lanzadera o máquinas circulares. En ambos casos no se producen descargas líquidas porque se trata de procesos secos.

Chamuscado o quemado.- el tejido plano se somete a un proceso de flameado para completar la eliminación de cascarillas y pelusas, resultando un tejido de espesor uniforme. Este proceso implica un lavado final de la tela con agua fría, que genera un nivel bajo de contaminación.

Desencolado o desengomado.- se remueve el agente encolante empleado para los tejidos planos. El desengomado puede ser ácido o enzimático. Para ello pueden utilizarse enzimas ácidas, detergentes alcalinos y jabones disueltos en agua; posteriormente se enjuaga la tela. El volumen de estas descargas resulta en promedio sólo el 15% del total; su aporte contaminante representa aproximadamente el 50% de la carga total expresada como DBO.

Mercerizado.- este proceso permite incrementar la resistencia tensil, el lustre y la afinidad de los colorantes sobre la fibra de algodón y las fibras sintéticas. Consiste en impregnar la tela o el hilado con una solución fría de hidróxido de sodio (15 a 30% en volumen). Este procedimiento se realiza manteniendo estirado el hilado o tejido bajo tensión. En algunos casos se elimina posteriormente el álcali con ayuda de algún ácido débil y se enjuaga con agua y vapor, provocándose la descarga consecuente. En otros, el exceso de soda en la tela o el hilado es aprovechado para el siguiente paso de descrude. Por otra parte, el primer enjuague de este proceso no acidulado puede concentrarse y recuperarse para su reuso en el mercerizado.

Descrude.- remueve impurezas naturales adheridas a las fibras y la tela para acondicionarla para las etapas posteriores de blanqueo o tintura. En este proceso se emplean soluciones alcalinas y detergentes en caliente, obteniéndose descargas semejantes a las descritas.

Blanqueo.- remueve la materia coloreada. Se utiliza sobre algodón y algunas fibras sintéticas después o en forma simultánea con el descrude y antes del teñido o estampado. El material textil, se trata con una solución diluida de los agentes blanqueadores (agua oxigenada o hipoclorito de sodio) y tenso activos. Después del blanqueo, la tela se enjuaga en agua y luego trata con sustancias reductoras que eliminan el exceso del agente oxidante.

Teñido.- es la etapa más compleja dentro de las operaciones de procesamiento húmedo; involucra una gran variedad de colorantes y agentes auxiliares de teñido. La calidad de la tintura depende del equipamiento empleado, la fórmula específica, los tintes y auxiliares de tintes que proveen el medio químico para su difusión y fijación sobre la fibra. La tintura puede realizarse en procesos discontinuos o de agotamiento y procesos continuos o de impregnación.

Estampado.- en contraposición al teñido, en el estampado se usan soluciones o dispersiones espesadas de esta manera, se evita que la partícula de colorante migre, reteniéndose el color en la superficie del estampado. De acuerdo con el diseño se usan pastas de almidón, dextrina o goma. Se realiza principalmente por dos procedimientos: estampado por rodillos y estampado en la malla.

En el estampado se producen contaminantes concentrados de importancia, originados en las maquinas de estampado y descargas propias de la preparación de pastas.

En resumen, de las descargas originadas en la industria textil, la mayor contaminación orgánica se concentra en las operaciones de descolado y descrude, y es menor en los procesos de teñido y estampado, mientras que la contaminación inorgánica proviene del lavado con sales de sodio, mercerizado, blanqueo y teñido. Los efluentes de esta manufactura suelen ser alcalinos, coloreados y con una DBO comprendida entre 300 y 1.000 mg/l. Los principales contaminantes son: almidones y glucosa, ceras, pectinas, agentes humectantes, auxiliares, sulfuros, sulfitos, ácido acético, detergentes, hipoclorito, agentes reductores y colorantes no biodegradables.

3.1.2. Caracterización del agua residual producida por la industria textil

A continuación se presentan la caracterización de muestra tomadas al agua residual producida durante la fabricación de telas, estas caracterizaciones se realizaron con la finalidad de que proporcionen una idea de los contaminantes principales que genera la industria.

CARACTERIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL PRODUCIDA POR LA INDUSTRIA TEXTIL

Caudal promedio de operación: 160 m³/d

Tiempo de operación: 8 h/d

Tipo de muestra: compuesta

Carga contaminante: 268 Kg DQO/d

Tabla 6. Caracterización del agua residual producida por la industria textil

Parámetros	Expresado como	Unidad	Agua residual	Límites máximos *	Método **
Potencial de Hidrógeno	pH	unidad	10	5 - 9	4500-H ⁺
Temperatura	T	°C	60	< 40	
Aceites y Grasas	A&G	mg/l	30	100	5520 D
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	4.500	-	2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	850	220	2540 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	1.150	250	DBO Track
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	1.680	500	5220 D
Cadmio	Cd	mg/l	0,028	0,02	8017 Hach
Cromo	Cr	mg/l	0,5	0,5	8023 Hach
Fenol	Fenol	mg/l	0,2	0,2	8047 Hach
Plomo	Pb	mg/l	0	0,5	8033 Hach
Color	Pt-Co	mg/l	537	-	8025 Hach
Cloro Activo	Cl	mg/l	0	0,5	8167 Hach

Fuente: Elaboración propia.

(*) Los límites máximos permisibles están establecidos en la legislación ambiental para descargas al alcantarillado público, debido a que la empresa está ubicada en un sector donde existe alcantarillado de aguas residuales domésticas.

(**) Los métodos Hach, han sido validados por el laboratorio, y estos métodos han sido aprobados por la EPA.

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WATER. 20ava EDICIÓN. AÑO 1998.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Examinando los diferentes parámetros de las Tablas 6, se observa lo siguiente:

- pH.- no cumple con la norma máxima permisible; es mayor que 9.
- Temperatura.- cumple con la norma de descarga en tres casos.
- Aceites y Grasas.- cumple con la norma de descarga.
- Sólidos Suspendidos Totales.- no cumple con la norma; tienen un valor superior a 220 mg/l.

- DBO_5 .- no cumple con la norma; tiene un valor superior a 250 mg/l.
- DQO.- no cumple con la norma; tiene un valor superior a 500 mg/l.
- DQO/DBO_5 = está entre 1,23 a 1,46. Esta relación indica que el agua residual de esta industria es bastante biodegradable.
- Cadmio.- no cumple con la norma de descarga.
- Cromo.- está en el límite de la norma.
- Plomo.- cumple con la norma.
- Compuestos fenólicos.- está en el límite de la norma.
- Cloro Activo.- de acuerdo al análisis; no hay desinfección con cloro.

De las caracterizaciones realizadas se aprecia que algunos parámetros no cumplen con la norma de descarga al alcantarillado público, motivo por el cual, esta industria textil no debe descargar directamente su agua residual cruda al sistema de alcantarillado pluvial, por este motivo instaló una planta de tratamiento de aguas residuales, para disminuir la concentración de los parámetros que están fuera de las normas, haciendo posible de esta manera su descarga al sistema de alcantarillado.

A continuación se presenta un diagrama de flujo y una descripción del proceso de tratamiento de aguas residuales que se realiza:

Tratamiento de aguas residuales
de textilera utilizando carbón activado

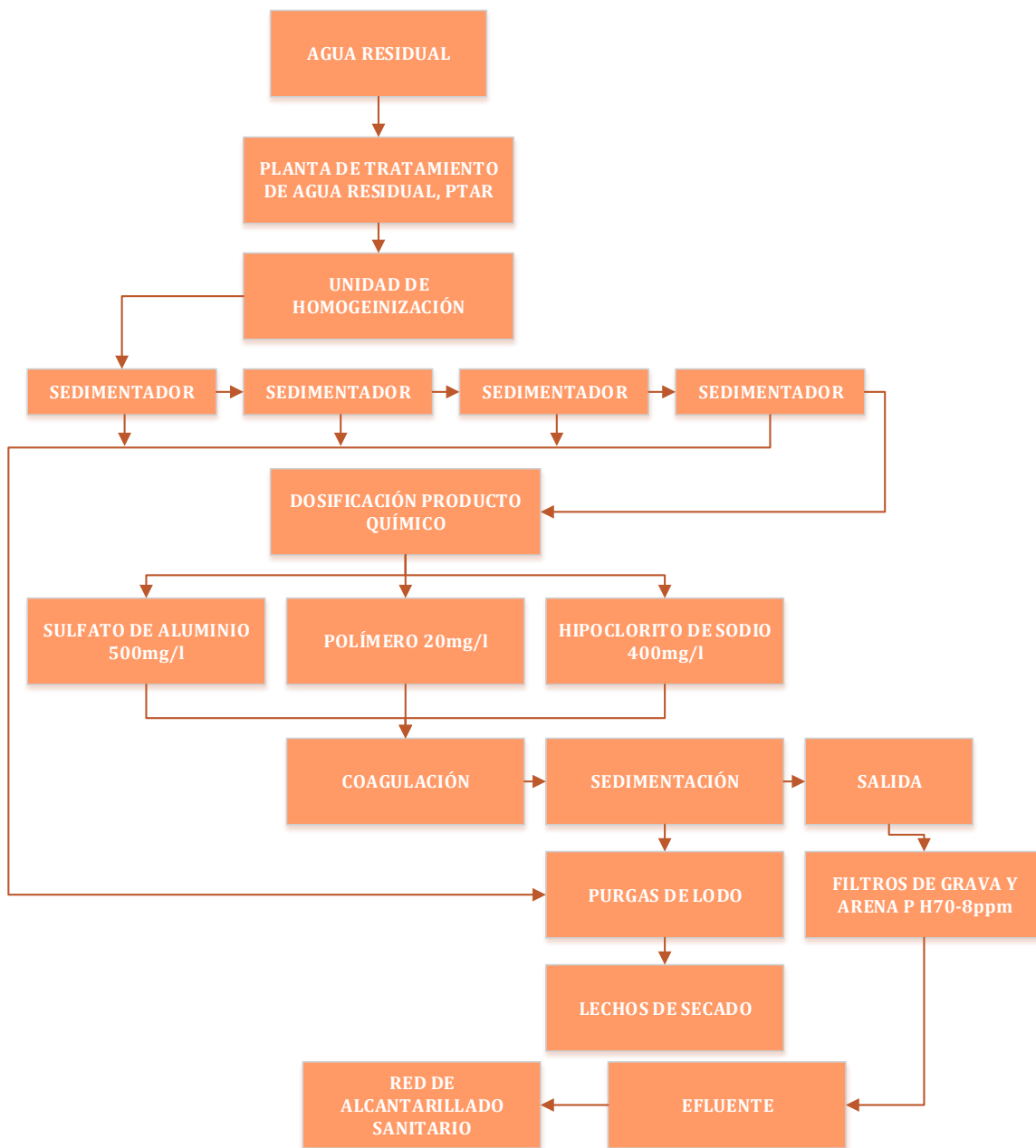


Figura 26. Diagrama de Flujo del Planta de Tratamiento
Fuente: Autoría propia.

3.1.3. Descripción del proceso de tratamiento en la planta de las aguas residuales industriales de la industria textil

El agua residual industrial es tratada según el siguiente proceso:

1. El afluente proveniente de la textilera es tratado en una planta con una capacidad de 20 m³/h. Recibiendo el afluente en un reservorio de 165 m³ para homogeneizar el agua.
2. El agua homogeneizada pasa por cuatro sedimentadores en serie, para eliminar parcialmente sólidos en suspensión.
3. Al agua clarificada que sale de los sedimentadores, se le adiciona sulfato de aluminio en dosis aproximadas de 500 mg/l, un polímetro con dosificación de 20 mg/l a pH 7, para la coagulación y floculación de las partículas coloidales; además, se le agrega hipoclorito de sodio en dosis aproximadas de 400 mg/l para eliminar por oxidación el color del agua.
4. El agua con las soluciones ingresa a la unidad de coagulación – floculación, sedimentación y clarificación, pasando, finalmente, a la cámara de agua tratada.
5. El agua es filtrada a presión en arena y grava; el efluente es descargado a la red de alcantarillado pluvial.
6. Los lodos provenientes de los sedimentadores y clarificadores son depositados en lechos de secado para su disposición posterior.

3.1.4. Caracterización del efluente de la planta de tratamiento

A continuación se presentan las caracterizaciones del efluente de la planta de tratamiento que evidencia el funcionamiento de la planta mencionada.

Tipo de muestra: compuesta

Caudal: 160 m³/d

Período de muestreo: 08h00 – 16h00

Carga contaminante: 97,36 kg DQO/d

Tabla 7. Caracterización del agua residual producida por la industria textil

Parámetros	Expresado como	Unidad	Agua residual	Límites máximos *	Método **
Potencial de Hidrógeno	pH	unidad	7	5 – 9	4500-H ⁺
Temperatura	T	°C	28	< 40	
Aceites y Grasas	A&G	mg/l	5	100	5520 D
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	2610	-	2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	50	220	2540 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	264	250	DBO Track
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	608,5	500	5220 D
Cadmio	Cd	mg/l	0,025	0,02	8017 Hach
Cromo	Cr	mg/l	0,20	0,5	8023 Hach
Fenol	Fenol	mg/l	0,1	0,2	8047 Hach
Plomo	Pb	mg/l	0,01	0,5	8033 Hach
Color	Pt-Co	mg/l	244	-	8025 Hach
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,19	0,5	8167 Hach

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los diferentes parámetros de la tabla 7, se observa lo siguiente:

- pH.- cumple con la norma máxima permisible.
- Temperatura.- cumple con la norma de descarga.
- Aceites y Grasas.- cumple con la norma de descarga.
- Sólidos Suspendidos Totales.- cumple con la norma.
- DBO₅.- no cumple con la norma; tiene un valor superior a 250 mg/l.
- DQO.- no cumple con la norma; tiene un valor superior a 500 mg/l.
- DQO/DBO₅ = 2,3.- esta relación indica que el agua residual es biodegradable.
- Cadmio.- cumple con la norma de descarga.
- Cromo.- cumple con la norma.
- Plomo.- cumple con la norma.
- Fenol.- cumple con la norma.
- Cloro Activo.- queda un residual del hipoclorito, adicionado durante el tratamiento.

De la caracterización realizada, se aprecia que algunos parámetros importantes como la DQO y DBO no cumplen con la norma de descarga al alcantarillado público.

De esta muestra de agua residual tratada, se realizaron las corridas experimentales para la determinación de la capacidad de adsorción con carbón activado granular Darco 12 x 20 de NORIT, en proceso "Bath".

3.2. ENSAYOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO EN PROCESO "BATH"

La capacidad de adsorción de un carbón activado se la encuentra, mediante la determinación de las isothermas respectivas y en el presente caso, mediante la determinación de la isoterma de Freundlich, según lo expresado en el numeral 1.09.10.

3.2.1. Procedimiento experimental para determinar la Isoterma de Freundlich

1. Determinar la DQO en el agua residual tratada, sometida a experimentación.
2. Llenar las seis jarras del equipo de la prueba, con un volumen apropiado de agua residual.
3. Se colocan cantidades variables de carbón activado en cada jarra de acuerdo a la relación X/m .
 - X = cantidad de sustancia adsorbida, g/l.
 - $X = C_0 - C$, g/l.
 - m = masa de carbón activado, g.
 - C_0 = concentración inicial del soluto, g/l.
 - C = concentración residual del soluto después de la adsorción, g/l
4. Hay presencia de compuestos volátiles, determinados mediante un análisis de sólidos totales volátiles, se incluye un testigo para controlar la remoción de dichos compuestos por agitación; es decir, se incluye una jarra con agua residual pero sin carbón activado.
5. Se agitan las jarras por un período determinado; un minuto de agitación rápida y 15 minutos de agitación lenta.
6. Se determina la concentración del parámetro de interés con el tiempo (DQO) en muestras previamente filtradas.
7. Cuando la concentración del contaminante se estabiliza en la jarra, se anota el tiempo transcurrido para alcanzar la concentración de equilibrio.
8. Se grafica el valor de C vs X/m , en papel log - log, con X/m como la ordenada y C como la abscisa. Cada jarra representa un punto sobre la recta.



Figura 27. Equipo para la realización de la prueba de las jarras-
Fuente: Elaboración propia.

ESPECIFICACIONES:

Marca: PHIPPS & BIRD STIRRER
MEDICAL UNIT OF GENERAL CORP.
PICHMOND, VA. 23228
Model: 7790-400
Serial: N° 109611124681

Rango seleccionable:

- Rango bajo: 0-25 rpm
- Rango alto: 0-335 rpm

Capacidad: 6 jarras de 2 litros cada una

Volt.: 120 V

Amp.: 0,65 A

HZ.: 50-60

3.2.2. Pruebas experimentales preliminares para la determinación de la capacidad de adsorción del carbón activado en proceso “Batch”

Con la prueba experimental realizada a la muestra de agua residual tratada, se determinó la capacidad de adsorción del carbón activado granular DARCO 12 x 20 de NORIT, en proceso “Batch”.

DQO: 281 mg/l

Volumen de la muestra colocada en las jarras: 1.000 ml

Agitación rápida: 1 minuto

Color aparente: 126 Pt/Co

Turbiedad: 27 NTU

pH: 7,10

Tabla 8. Resultado de pruebas

Dosis de carbón, g	Color, a 2 h	Color, a 24 h	Turbiedad, a 2 h	Turbiedad, a 24 h	pH, a 2 h	pH, a 24 h	DQO, a 2 h	DQO, a 24 h
20	42	31	9	8	7,40	7,21	168,2	156,8
40	39	25	7	8	7,40	7,24	146,4	134,3
60	26	36	7	9	7,36	7,25	133,5	121,8
80	21	48	5	15	7,38	7,39	120,8	109,3
100	32	57	9	17	7,55	7,33	110,6	99,3
120	25	40	5	12	7,22	7,10	102,9	94,3

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Datos experimentales para el cálculo de la Isoterma de Freundlich obtenidos en la Prueba de Jarras

Se utilizaron los parámetros determinados en la prueba experimental.

$$DQO = 281 \text{ mg/l}$$

Tabla 9. Masa de carbón activado granular y DQO determinadas de la Tabla 14

Carbón Activado, g	DQO, mg/l
20	156,8
40	134,3
60	121,8
80	109,3
100	99,3
120	94,3

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3.1. Análisis matemático de los datos experimentales

$$X = C_0 - C$$

$$X = 281,0 - 156,8 = 124,2 \text{ mg/l} = 0,124 \text{ g/l}$$

m = masa de carbón activado granular, g

$$X/m = 0,124/20 = 0,0062 \text{ g DQO/l/g de carbón}$$

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS

Tabla 10. Resultado de pruebas

Carbón Activado, g	DQO, mg/l	X/m
20	156,8	0,00620
40	134,3	0,00366
60	121,8	0,00260
80	109,3	0,00210
100	99,3	0,00180
120	94,3	0,00155

Fuente: Elaboración propia.

DQO vs X/m PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ISOTERMA DE FREUNDLICH

Tabla 11. Resultado de pruebas

DQO mg/l	X/m
156,8	0,00620
134,3	0,00366
121,8	0,00260
109,3	0,00210
99,3	0,00180
94,3	0,00155

Fuente: Elaboración propia.

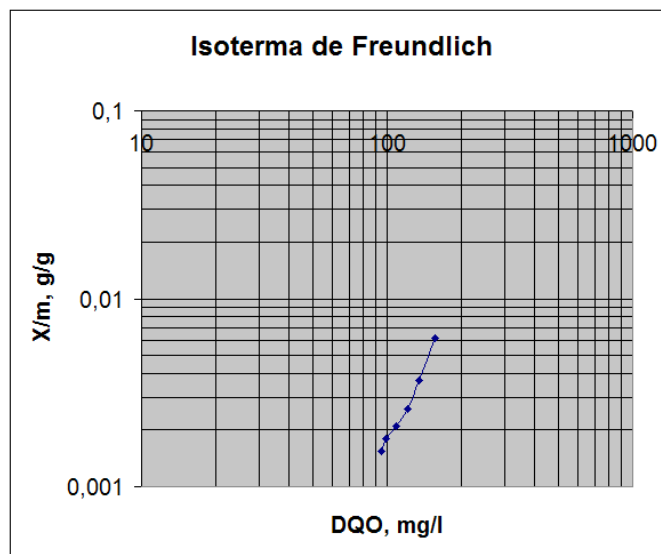


Figura 28. Isoterma de Freundlich
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 28, es el resultado de representar en papel log-log, la cantidad del componente adsorbido (X), expresado en términos de la DQO (mg/l), por unidad de carbón activado utilizado m(g), contra la concentración de dicho componente en el equilibrio (mg/l); resultando una línea recta, tal como lo sugieren algunos autores como Metcalf y Eddy, en Ingeniería de Aguas Residuales, volumen 1, página 364, y Jairo Rojas, en su libro, Purificación del Agua, página 320. Esta isoterma de adsorción es una ecuación de equilibrio y se aplica para dichas condiciones; es decir, para un tiempo suficiente de contacto entre el adsorbente y adsorbato para alcanzar el equilibrio.

Para la determinación de la ecuación de la Isoterma de Freundlich, se necesita encontrar el valor de K (constante para cada soluto), que será igual al valor del intercepto de la recta con el eje de las ordenadas (y), según la ecuación:

$$\text{Log } q = \log(X/m) = \log K + (1/n)\log C$$

Para lo cual se requiere prolongar, la recta de la Figura 28 hasta cortar el eje de la ordenada (y), que en el caso de análisis coincidirá con el valor de 1 (logaritmo de 1 es igual a cero), en la abcisa, y el valor de 0,000000012 en la ordenada, que serán introducidos en la tabla 12.

Tabla 12. DQO vs X/m para la determinación de la Isoterma de Freundlich partiendo del origen

DQO mg/l	X/m
156,8	0,006200000
134,3	0,003660000
121,8	0,002600000
109,3	0,002100000
99,3	0,001800000
94,3	0,001550000
1,0	0,000000012

Fuente: Elaboración propia.

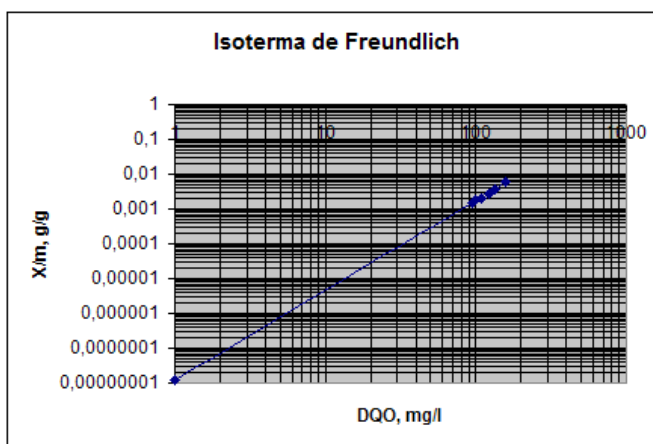


Figura 29. Isoterma de Freundlich partiendo del origen

Fuente: Elaboración propia.

Determinación de la ecuación de la Isoterma de Freundlich

- De la Figura 29, se lee el valor de K (constante para cada soluto en el intercepto del eje Y).

$$K = 1.2 \times 10^{-8} \text{ (este valor es determinado visualmente).}$$

- Se determina la pendiente de la recta, escogiendo dos valores representativos para la ordenada y abcisa de la Figura 29.

$$\text{Para: } X/m = 0,01 \text{ de la Figura 29, se lee: DQO} = 195 \text{ mg/l}$$

$$\text{Para: } X/m = 0,000001 \text{ de la Figura 29, se lee: DQO} = 5,6 \text{ mg/l}$$

- Se calcula la pendiente de la recta = $1/n$ por la ecuación (Romero Rojas, 2000).

$$\begin{aligned} \text{Pendiente} = 1/n &= (\text{Log } 0,01 - \text{Log } 0,000001) / (\text{log}195 - \text{log } 5,6) \\ &= -2 - (-6) / (2,29 - 0,748) = 2,594 \end{aligned}$$

Ecuación de la Isoterma:

$$q = X/m = KC^{1/n}$$

Resulta la ecuación siguiente para el carbón activado granular Darco 12 x 20 de NO-RIT, usado en el tratamiento de un agua residual proveniente de la industria textil.

Ecuación:

$$X/m = 1,2 \times 10^{-8} C^{2,594}$$

3.3. CORRIDA EXPERIMENTAL EN LAS COLUMNAS DE LABORATORIO EN PROCESO CONTINUO PARA LA DETERMINACION DE LAS CURVAS TÍPICAS DE RUPTURA

Se procedió a realizar las corridas experimentales, utilizando muestras de agua residual, proveniente de la planta de tratamiento de la industria textil.

EXPERIMENTO 1

Para este experimento se utilizó agua residual de las siguientes características:

Tipo de muestra: compuesta

Caudal: $160 \text{ m}^3/\text{d}$

Período de muestreo: 07h00 – 15h00

Carga contaminante: $129,92 \text{ kg DQO/d}$

Tabla 13. Experimento 1

Parámetros	Expresado como	Unidad	Agua residual	Límites máximos	Método
Potencial de Hidrógeno	pH	unidad	5,98	5 - 9	4500-H+
Temperatura	T	°C	30	< 40	
Aceites y Grasas	A&G	mg/l	20	100	5520 D
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	3.470	-	2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	170	220	2540 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/l	325	250	DBO Track
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	812	500	5220 D
Cadmio	Cd	mg/l	0,01	0,02	8017 Hach
Cromo	Cr	mg/l	0,025	0,5	8023 Hach
Fenol	Fenol	mg/l	0,1	0,2	8047 Hach
Plomo	Pb	mg/l	0,04	0,5	8033 Hach
Color	Pt-Co	mg/l	107	-	8025 Hach
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,4	0,5	8167 Hach

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los diferentes parámetros de la Tabla 13, se observa lo siguiente:

- pH.- cumple con la norma máxima permisible.
- Temperatura.- cumple con la norma de descarga.
- Aceites y Grasas.- cumple con la norma de descarga.
- Sólidos Suspendidos Totales.- cumple con la norma.
- DBO₅.- cumple con la norma; tiene un valor superior a 250 mg/l.
- DQO.- no cumple con la norma; tiene un valor de 850 mg/l, superior a 500 mg/l de la norma.
- DQO/DBO₅ = 2.49.- esta relación indica que el agua residual es biodegradable.
- Cadmio.- cumple con la norma de descarga
- Cromo.- cumple con la norma.
- Plomo.- cumple con la norma.
- Fenol.- cumple con la norma.
- Cloro Activo.- cumple con la norma, queda un residual del hipoclorito, adicionado durante el tratamiento.

De la caracterización realizada, se aprecia que algunos parámetros importantes como la DQO no cumplen con la norma de descarga al alcantarillado público, porque el valor de la DQO es bastante alto (850 mg/l).

Con esta agua residual, se procedió a realizar el experimento 1, en una columna del equipo de laboratorio, pasando el agua residual a través de un lecho de carbón con una altura de 60 cm, obteniéndose los resultados tabulados en la tabla 13.

Las condiciones iniciales del experimento fueron:

CONDICIONES INICIALES:

Muestra: agua residual tratada de la industria textil

Caudal: 10 l/h

Área de la columna = 0,00196 m²

Diámetro de la columna: 5 cm

Altura lecho de carbón = 0,6 m

Carga hidráulica = 85 l/min.m²

Tipo de carbón: Darco 12 x 20 DE NORIT

DQO: 812 mg/l

Tabla 14. Datos para curva típica de ruptura

Tiempo, min	DQO, mg/l	pH
0	812	5,98
30	702	6,43
60	680	6,15
90	639	5,94
120	652	5,66
150	656	5,49
180	686	5,35
210	683	5,44
240	671	5,30
270	689	5,34
300	676	5,32
330	688	5,35
360	720	5,37
390	755	5,40

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los datos obtenidos en la Tabla 14, se observa lo siguiente:

- Este experimento se realizó, utilizando una sola columna con una altura de lecho de carbón de 60 cm, para observar la variación de la DQO al pasar el agua residual a través del lecho a diferentes tiempos de operación.
- A medida que transcurre el tiempo de operación, por acción del carbón activado, la DQO va disminuyendo hasta llegar a un valor mínimo a partir del cual empieza a subir.
- El pH, del agua residual varía muy poco durante el proceso; es decir, se mantiene la acidez del medio.

Los datos obtenidos en el experimento 1 y registrados en la tabla 14, se grafican para obtener la curva de ruptura (Figura 30).

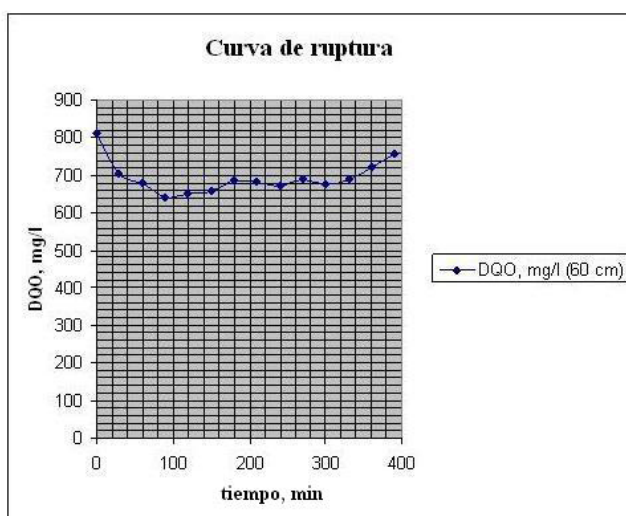


Figura 30. Representación de datos Tabla 23
Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo al comportamiento de la curva se observa, que la DQO disminuye hasta un valor mínimo de 639 mg/l, a los 90 minutos de operación, manteniéndose alrededor de este valor hasta los 300 minutos, a partir del cual empieza la DQO a subir, señal de que el carbón se está saturando; no se continuó con la prueba, porque se terminó el agua residual disponible.

De esta prueba preliminar se puede deducir lo siguiente:

- Hay que trabajar mayor tiempo de operación, para llegar a la saturación, lo que implica el uso de mayor cantidad de agua residual.
- Para acortar el tiempo de operación se deberá trabajar, con flujos altos, partiendo de 30 hasta 60 l/h, que permite la capacidad del rotámetro y la bomba instalada.

- Se deben utilizar las cuatro columnas construidas para lograr la mayor disminución posible de la DQO, y observar su variación con relación a las distintas alturas del lecho de carbón.

EXPERIMENTO 2

Para este experimento se utilizó agua residual de las siguientes características:

Tipo de muestra: compuesta

Caudal: 160 m³/d

Período de muestreo: 08h00 – 16h00

Carga contaminante: 164,16 kg DQO/d

Tabla 15. Experimento 2

Parámetros	Expresado como	Unidad	Agua residual	Límites máximos	Método
Potencial de Hidrógeno	pH	unidad	6,25	5 - 9	4500-H+
Temperatura	T	°C	30	< 40	
Aceites y Grasas	A&G	mg/l	25	100	5520 D
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	3.600	-	2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	260	220	2540 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/l	380	250	DBO Track
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	1.026	500	5220 D
Cadmio	Cd	mg/l	0,02	0,02	8017 Hach
Cromo	Cr	mg/l	0,15	0,5	8023 Hach
Fenol	Fenol	mg/l	0,15	0,2	8047 Hach
Plomo	Pb	mg/l	0,03	0,5	8033 Hach
Color	Pt-Co	mg/l	130	-	8025 Hach
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,3	0,5	8167 Hach

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los diferentes parámetros de la Tabla 15, se observa lo siguiente:

- pH.- cumple con la norma máxima permisible.
- Temperatura.- cumple con la norma de descarga.
- Aceites y Grasas.- cumple con la norma de descarga.

- Sólidos Suspendidos Totales.- no cumple con la norma.
- DBO5.- no cumple con la norma; tiene un valor superior a 250 mg/l.
- DQO.- no cumple con la norma; tiene un valor superior a 500 mg/l.
- DQO/DBO5 = 2.7.- esta relación indica que el agua residual es biodegradable.
- Cadmio.- cumple con la norma de descarga.
- Cromo.- cumple con la norma.
- Plomo.- cumple con la norma.
- Fenol.- cumple con la norma.
- Cloro Activo.- cumple con la norma, queda un residual del hipoclorito, adicionado durante el tratamiento.

De la caracterización realizada, se aprecia que algunos parámetros importantes como la DQO y DBO, no cumplen con la norma de descarga al alcantarillado público, porque el valor de la DQO es bastante alto (1.026 mg/l).

Con esta agua residual, se procedió a realizar el experimento 2, aplicando lo observado en el experimento 1, se utilizaron tres columnas del equipo de laboratorio, pasando un mayor caudal de agua residual a través de un lecho de carbón con una altura de 60 cm, dos lechos con una altura total de 120 cm, y tres lechos con una altura total de 180 cm, obteniéndose los resultados tabulados en la tabla 16.

Las condiciones iniciales del experimento fueron:

CONDICIONES INICIALES:

Muestra: agua residual tratada de la industria textil
Caudal: 28 l/h
Área de la columna = 0,00196 m²
Diámetro de la columna: 5 cm
Altura de un lecho de carbón = 0,6 m
Altura de dos lechos de carbón = 1,2 m
Altura de tres lechos de carbón = 1,8 m
Carga hidráulica = 238 l/min.m²
Tipo de carbón: Darco 12 x 20 DE NORIT
DQO: 1,026 mg/l

Tabla 16. Condiciones Iniciales para curva típica de ruptura.

Tiempo, min	DQO, mg/l (60 cm)	DQO, mg/l (60 cm)	DQO, mg/l (60 cm)
0	1.026	1.026	1.026
60	980	951	910
120	798	763	752
180	603	588	551
240	511	490	471
300	560	502	485
360	590	485	478
420	840	480	500
480	998	540	495
540	1.026	580	520
600		720	505
660		750	490
720		820	550
780		950	580

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los datos obtenidos en la tabla 16, se observa lo siguiente:

- Este experimento se realizó utilizando tres columnas con alturas de lecho de carbón de 60, 120 y 180 cm, respectivamente, para observar la variación de la DQO al pasar el agua residual a través de los tres lechos de carbón, a diferentes tiempos de operación.
- A medida que transcurre el tiempo de operación, por acción del carbón activado, la DQO va disminuyendo en cada lecho de carbón, observándose, que esta disminución es mayor en el lecho de 180 cm, comparado con el de 120 cm, y 60 cm, a diferentes tiempos de operación, hasta llegar a un valor mínimo a partir del cual empieza a subir en cada uno de los lechos de carbón.

Los datos obtenidos en el experimento 2 y registrados en la tabla 16, se grafican, para obtener la curva de ruptura (Figura 31).

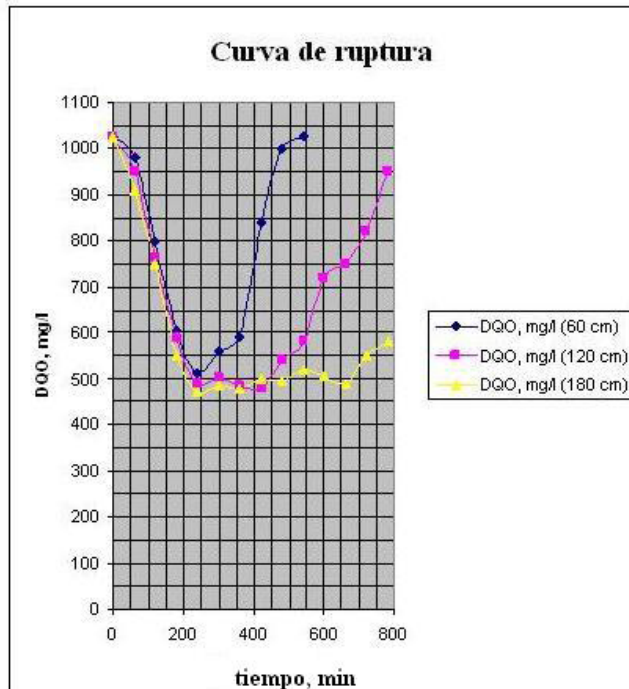


Figura 31. Representación de datos Tabla 16
Fuente: Elaboración propia.

En el experimento se obtuvieron tres curvas, una para cada altura de lecho de carbón, donde se observa que la DQO inicial de 1.026 mg/l, disminuye en los distintos lechos hasta unos valores mínimos comprendidos entre 471 y 511 mg/l; luego en el lecho que contiene 60 cm de carbón, a partir de los 300 minutos de operación, la DQO empieza a subir, señal de que el carbón se está saturando; a los 540 minutos, el valor de la DQO es igual al inicial; es decir el carbón está saturado en el lecho de 120 cm, se mantiene la DQO mínima por más tiempo; luego a partir de los 480 minutos de operación, empieza a subir, señal de saturación de este lecho; finalmente el lecho de 180 cm, se mantiene con valores de DQO, cercanos al mínimo, dando por terminado el proceso a los 780 minutos, por haberse consumido el agua residual, sin que se sature completamente este lecho.

EXPERIMENTO 3

Con los resultados de los experimentos 1 y 2, se planificó el experimento 3, en el que se realizaron tres pruebas experimentales: A, B y C, contando con la misma agua residual y suficiente cantidad. Siguiendo las recomendaciones de Ramalho, páginas 594, 595, 596 y 597, de su libro “Tratamiento de Aguas Residuales”, Editorial Reverte, S.A. 1996, a fin de obtener los parámetros y las curvas de diseño respectivas, se varió el flujo de alimentación del agua residual y las alturas del lecho de carbón, utilizando un agua residual con las siguientes características:

Tipo de muestra: compuesta

Caudal: 160 m³/d

Período de muestreo: 07h00 – 15h00

Carga contaminante: 62,88 kg DQO/d

Tabla 17. Experimento 3

Parámetros	Expresado como	Unidad	Agua residual	Límites máximos	Método
Potencial de Hidrógeno	pH	unidad	5	5 - 9	4500-H+
Temperatura	T	°C	28	< 40	
Aceites y Grasas	A&G	mg/l	35	100	5520 D
Sólidos Disueltos Totales	SDT	mg/l	2.800	-	2540 C
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	60	220	2540 D
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/l	160	250	DBO Track
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	393	500	5220 D
Cadmio	Cd	mg/l	0,02	0,02	8017 Hach
Cromo	Cr	mg/l	0,02	0,5	8023 Hach
Fenol	Fenol	mg/l	0,15	0,2	8047 Hach
Plomo	Pb	mg/l	0,365	0,5	8033 Hach
Color	Pt-Co	mg/l	411	-	8025 Hach
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5	0,5	8167 Hach

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los diferentes parámetros de la tabla 17, se observa lo siguiente:

- pH.- cumple con la norma máxima permisible.
- Temperatura.- cumple con la norma de descarga.
- Aceites y Grasas.- cumple con la norma de descarga.
- Sólidos Suspendidos Totales.- cumple con la norma.
- DBO₅.- cumple con la norma; tiene un valor inferior a 250 mg/l.
- DQO.- cumple con la norma; tiene un valor inferior a 500 mg/l.
- DQO/DBO₅ = 2.45.- esta relación indica que el agua residual es biodegradable.
- Cadmio.- cumple con la norma de descarga.
- Cromo.- cumple con la norma.
- Plomo.- cumple con la norma.
- Fenol.- cumple con la norma.
- Cloro Activo.- cumple con la norma, queda un residual del hipoclorito, adicionado durante el tratamiento.

De la caracterización realizada, se aprecia que todos los parámetros cumplen con la norma de descarga al alcantarillado público.

Con esta agua residual, se procedió a realizar las pruebas A, B y C, obteniéndose los siguientes resultados:

PRUEBA A

Las condiciones iniciales de la prueba fueron:

CONDICIONES INICIALES:

Muestra: agua residual tratada de la industria textil
Caudal: 30 l/h
Área de la columna = 0,00196 m²
Diámetro de la columna: 5 cm
Altura de un lecho de carbón = 0,6 m
Altura de dos lechos de carbón = 1,2 m
Altura de tres lechos de carbón = 1,8 m
Carga hidráulica = 255 l/min.m²
Tipo de carbón: Darco 12 x 20 DE NORIT
DQO: 393 mg/l

Se obtuvieron los resultados tabulados en la tabla 17.

Tabla 18. Condiciones experimentales de Prueba A

Tiempo, min	DQO, mg/l (60 cm)	DQO, mg/l (60 cm)	DQO, mg/l (60 cm)
0	393	393	393
60	286	277	265
120	236	245	240
180	245	236	222
240	300	239	230
300	393	245	236
360		238	240
420		250	235
480		244	250
540		252	244
600		240	234
660		254	252
720		278	248
780		305	255
840		393	260
900			248
960			250
1.020			260
1.080			270
1.140			274
1.200			300

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los datos obtenidos en la tabla 18, se observa lo siguiente:

- Esta prueba se realizó utilizando tres columnas con una altura de lecho de carbón de 60, 120 y 180 cm, respectivamente, para observar la variación de la DQO al pasar el agua residual a través de los tres lechos a diferentes tiempos de operación.
- A medida que transcurre el tiempo de operación, por acción del carbón activado, la DQO va disminuyendo en cada lecho de carbón, observándose, que esta disminución es mayor en el lecho de 180 cm, comparado con el de 120 cm, y 60 cm, a diferentes tiempos de operación, hasta llegar a un valor mínimo a partir del cual empieza a subir, en cada uno de los lechos de carbón.

Los datos obtenidos en la prueba A, registrados en la tabla 18, se grafican, para obtener la curva de ruptura (Figura 32).

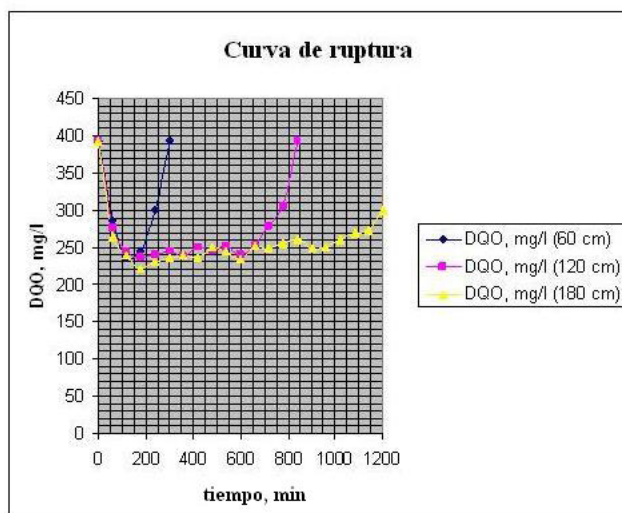


Figura 32. Representación de datos Tabla 18
Fuente: Elaboración propia.

En la prueba, se obtuvieron tres curvas, una para cada altura de lecho de carbón, donde se observa que la DQO inicial de 393 mg/l, disminuye en los distintos lechos de carbón hasta unos valores mínimos comprendidos entre 236 y 245 mg/l, luego en el lecho que contiene 60 cm de carbón, a partir de los 180 minutos de operación, la DQO empieza a subir, señal de que el carbón se está saturando, llegando a los 300 minutos de operación, cuando el carbón está saturado, porque el valor de la DQO que sale del lecho de carbón es igual al valor inicial de la DQO; en el lecho de 120 cm de carbón, se mantiene la DQO mínima por más tiempo, luego a partir de los 420 minutos de operación empieza a subir, llegándose a saturar completamente a los 840 minutos de operación; finalmente el lecho de 180 cm se mantiene en valores de la DQO, cercanos al mínimo hasta los 1.140 minutos de operación, a partir del cual el valor de la DQO empieza a subir, dando por terminado el proceso a los 1.200 minutos, por haberse consumido el agua residual sin que se sature completamente este lecho.

PRUEBA B

Con la misma muestra de agua residual, usada para la prueba A, se realizó la prueba B, cambiando el caudal de alimentación y las alturas del lecho de carbón de acuerdo a lo recomendado por Ramalho, para la obtención de las curvas y los parámetros de diseño.

Las condiciones iniciales de la prueba fueron:

CONDICIONES INICIALES:

Muestra: agua residual tratada de la industria textil

Caudal: 45 l/h

Área de la columna = 0,00196 m²

Diámetro de la columna: 5 cm

Altura de un lecho de carbón = 0,7 m

Altura de dos lechos de carbón = 1,4 m

Altura de tres lechos de carbón = 2,1 m

Carga hidráulica = 382 l/min.m²

Tipo de carbón: Darco 12 x 20 DE NORIT

DQO: 393 mg/l

Se obtuvieron los resultados tabulados en la tabla 18.

Tabla 19. Condiciones experimentales de Prueba B

Tiempo, min	DQO, mg/l (60 cm)	DQO, mg/l (60 cm)	DQO, mg/l (60 cm)
Tiempo, min	DQO, mg/l (70 cm)	DQO, mg/l (140 cm)	DQO, mg/l (210 cm)
0	393	393	393
60	300	290	286
120	240	265	280
180	255	240	265
240	320	230	240
300	380	245	230
360	393	260	220
420		255	225
480		268	235
540		295	240
600		330	245
660		385	230
720		393	250
780			260
840			285

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los datos obtenidos en la tabla 19, se observa lo siguiente:

- Esta prueba se realizó utilizando tres columnas con una altura de lecho de carbón de 70, 140 y 210 cm, respectivamente, para observar la variación de la DQO.
- A medida que transcurre el tiempo de operación por acción del carbón activado, la DQO va disminuyendo en cada lecho, observándose que esta disminución es mayor en el lecho de 210 cm, comparado con el de 140 cm y 70 cm, a diferentes tiempos de operación, hasta llegar a un valor mínimo a partir del cual empieza a subir en cada uno de los lechos de carbón.

Los datos obtenidos en la prueba B, registrados en la tabla 19, se grafican, para obtener la curva de ruptura (Figura 33).

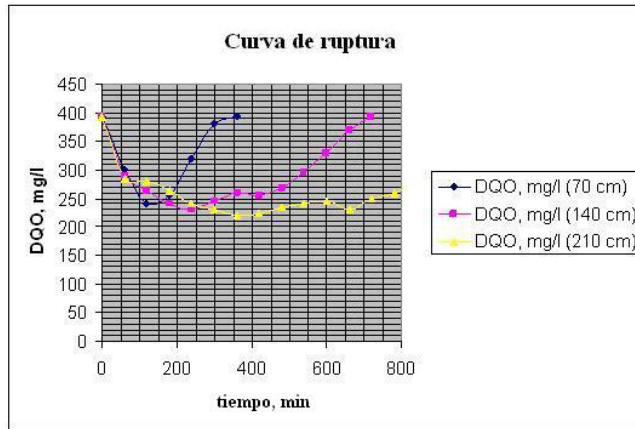


Figura 33. Representación de datos Tabla 19
Fuente: Elaboración propia.

En la prueba se obtuvieron tres curvas, una para cada altura de lecho de carbón, donde se observa que la DQO inicial de 393 mg/l, disminuye en los distintos lechos de carbón, hasta unos valores mínimos comprendidos entre 220 y 240 mg/l; luego en el lecho que contiene 70 cm de carbón, a partir de los 180 minutos de operación, la DQO empieza a subir, señal que el carbón se está saturando, llegando a los 300 minutos de operación, donde el carbón está saturado, porque el valor de la DQO que sale del lecho de carbón es igual al valor inicial de la DQO; en el lecho de 140 cm de carbón, se mantiene la DQO mínima por más tiempo; luego a partir de los 300 minutos de operación empieza a subir, llegándose a saturar completamente a los 720 minutos de operación. Finalmente el lecho de 210 cm se mantiene en valores de la DQO, cercanos al mínimo, hasta los 720 minutos de operación, a partir del cual el valor de la DQO empieza a subir, dando por terminado el proceso a los 840 minutos, por haberse consumido el agua residual, sin que se sature completamente este lecho.

PRUEBA C

Con la misma muestra de agua residual usada para las pruebas A y B, se realizó la prueba C, cambiando el caudal de alimentación y las alturas del lecho de carbón, de acuerdo a lo recomendado por Ramalho, para la obtención de las curvas y los parámetros de diseño.

Las condiciones iniciales de la prueba fueron:

CONDICIONES INICIALES:

Muestra: agua residual tratada de la industria textil

Caudal: 60 l/h

Área de la columna = 0,00196 m²

Diámetro de la columna: 5 cm

Altura de un lecho de carbón = 0,8 m

Altura de dos lechos de carbón = 1,6 m

Altura de cuatro lechos de carbón = 3,2 m

Carga hidráulica = 510 l/min.m²

Tipo de carbón: Darco 12 x 20 DE NORIT

DQO: 393 mg/l

Se obtuvieron los resultados tabulados en la tabla 19.

Tabla 20. Condiciones experimentales de Prueba C.

Tiempo, min	DQO, mg/l (80 cm)	DQO, mg/l (160 cm)	DQO, mg/l (320 cm)
Tiempo, min	DQO, mg/l (70 cm)	DQO, mg/l (140 cm)	DQO, mg/l (210 cm)
0	393	393	393
60	240	230	232
120	248	220	224
180	320	238	222
240	380	250	238
300	393	240	228
360		245	240
420		272	245
480		298	242
540		340	246
600		393	240
660			250
720			260
780			280

Fuente: Elaboración propia.

Examinando los datos obtenidos en la tabla 20, se observa lo siguiente:

- Esta prueba se realizó utilizando cuatro columnas con una altura de lecho de carbón de 80, 160 y 320 cm, respectivamente, para observar la variación de la DQO.
- A medida que transcurre el tiempo de operación por acción del carbón activado, la DQO va disminuyendo en cada lecho de carbón, observándose, que esta disminución es mayor en el lecho de 320 cm, comparado con el de 160 cm y 80 cm, a diferentes tiempos de operación, hasta llegar a un valor mínimo a partir del cual empieza a subir, en cada uno de los lechos de carbón.

Los datos obtenidos en la prueba C, registrados en la tabla 20, se grafican, para obtener la curva de ruptura (Figura 34).

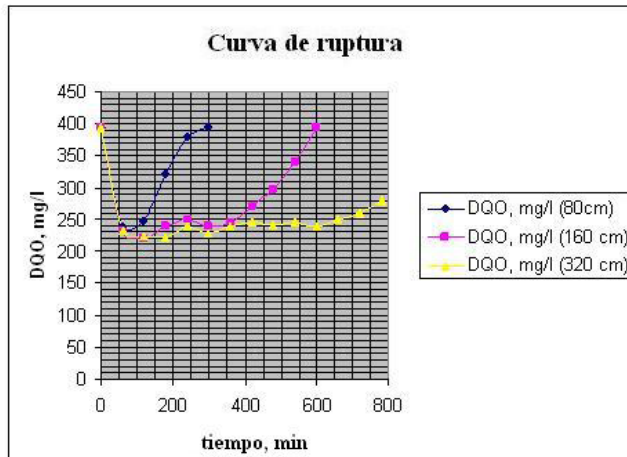


Figura 34. Representación de datos Tabla 20

Fuente: Elaboración propia.

En la prueba se obtuvieron tres curvas, una para cada altura de lecho de carbón, donde se observa que la DQO inicial de 393 mg/l, disminuye en los distintos lechos de carbón hasta unos valores mínimos comprendidos entre 220 y 240 mg/l. En el lecho que contiene 80 cm de carbón, a partir de los 120 minutos de operación, la DQO empieza a subir, señal de que el carbón se está saturando, llegando a los 300 minutos de operación donde el carbón está saturado, porque el valor de la DQO que sale del lecho es igual al valor inicial. En el lecho de 160 cm de carbón, se mantiene la DQO mínima por más tiempo; luego a partir de los 420 minutos de operación empieza a subir, llegándose a saturar completamente a los 600 minutos de operación. Finalmente el lecho de 320 cm de carbón, se mantiene en valores de la DQO cercanos al mínimo, hasta los 660 minutos de operación, a partir del cual el valor de la DQO, empieza a subir, dando por terminado el proceso a los 780 minutos, por haberse consumido el agua residual sin que se sature completamente este lecho.

3.3.1. Determinación de las curvas típicas de ruptura para la adsorción con el carbón activado a partir de los datos del experimento 3 y las pruebas A, B, C.

En las pruebas A, B y C del experimento 3, se trabajó con la misma agua residual tratada, con flujos de alimentación de: 30, 45 y 60 l/h, y diferentes alturas de lechos de carbón, habiéndose obtenido resultados y curvas bastante representativas, por lo que estos resultados servirán de base para la obtención de los gráficos de diseño, según el procedimiento establecidos por R. S. Ramalho, en su libro "Tratamiento de Aguas Residuales", página N^o 594. Editorial Reverte, S. A. 1996.

Para determinar los parámetros de diseño, los datos requeridos sobre la eliminación de contaminantes, se obtuvo pasando el agua residual que contiene una cantidad conocida de contaminantes, DQO inicial = 393 mg/l, (C_0), a través de tres columnas de carbón activado granular Darco 12 x 20, en las pruebas A y B, y cuatro columnas en la prueba C, registrándose los tiempos t (t_1, t_2, t_3) a los cuales las concentraciones de los efluentes de las columnas 1, 2 y 3 alcanzan la concentración de ruptura que fue de $DQO_E = 236$ mg/l, (C_E) (promedio).

Cada prueba experimental se llevó a cabo con una carga hidráulica constante de 255, 382 y 510 l/min.m², manteniendo constante la velocidad lineal de alimentación.

El efluente de la primera columna es el primero en alcanzar la concentración de ruptura $DQO = 236$ mg/l, registrándose el tiempo t_1 . Algún tiempo después, el efluente de la columna 2 alcanza el valor de la $DQO = 236$ mg/l, registrándose el tiempo t_2 . Finalmente el efluente de la columna 3 alcanza el valor de la $DQO = 236$ mg/l, registrándose el tiempo t_3 dando por terminado la experimentación. En consecuencia, el experimento se lleva a cabo hasta que se alcanza el punto de ruptura en la última columna.

3.4. OBTENCIÓN DE DATOS PARA LOS GRÁFICOS BÁSICOS DE DISEÑO

3.4.1. Obtención de datos para el gráfico tiempo de operación vs profundidad del lecho

De acuerdo al procedimiento propuesto por el libro de Ramalho, páginas: 594, 595 y 596, y de las curvas típicas de ruptura: Figura 32, 33 y 34, de las pruebas A, B y C del experimento 3, se obtienen los datos necesarios para la tabla 21.

Tabla 21. Tiempo de ruptura en función de profundidad de lecho.

Prueba	Carga hidráulica, l/min.m ²	Profundidad del lecho, cm	Tiempo t, min	Volumen total tratado, l	Observación
A	255	60	160	79,96	3 columnas
		120	660	329,86	
		180	1.200	599,76	
B	382	70	150	112,30	3 columnas
		140	460	344,41	
		210	840	628,92	
C	510	80	100	99,96	4 columnas
		160	380	379,84	
		320	800	799,68	

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla representa una tabulación típica de tiempo de ruptura (t); es decir, el tiempo en el cual empieza a aumentar la concentración de la DQO, en función de la profundidad del lecho de carbón (D) para cargas hidráulicas diferentes.

En la prueba A, se utilizaron tres columnas de 60 cm. de profundidad de carbón en cada una, correspondiendo a profundidades totales de 60, 120 y 180 cm, en los puntos de muestreo. El tiempo de ruptura para la columna de 60 cm, leído en la Figura 32 es de 160 min para la columna de 120 cm, es 660 min, y para la columna de 180 cm, es 1.200 min. La carga hidráulica fue de 255 l/min.m².

En la prueba B, se utilizaron tres columnas de 70 cm de profundidad de carbón en cada una, correspondiendo a profundidades totales de 70, 140 y 210 cm, en los puntos de muestreo. El tiempo de ruptura para la columna de 70 cm, leído en la Figura 33, es de 150 min, para la columna de 140 cm., es 460 min, y para la columna de 210 cm, es 840 min. La carga hidráulica fue de 382 l/min.m².

En la prueba C, se utilizaron cuatro columnas de 80 cm de profundidad de carbón en cada una, correspondiendo a profundidades totales de 80, 160 y 320 cm en los puntos de muestreo. El tiempo de ruptura para la columna de 80 cm, leído en la Figura 34, es

de 100 min, para la columna de 160 cm, es de 380 min, y para la columna de 320 cm, es 800 min. La carga hidráulica fue de 510 l/min.m².

En la tabla 21 se aprecia, que a medida que aumenta la carga hidráulica, disminuye el tiempo de ruptura, a pesar de haberse aumentado la profundidad del lecho de carbón, explicable por el aumento de caudal de alimentación de agua residual.

El volumen total de agua residual tratada, se obtiene multiplicando la carga hidráulica por el tiempo de ruptura y por el área de la columna, dando los resultados tabulados en la tabla 21.

3.4.2. Cálculo del volumen total tratado para la Prueba A

$$255 \text{ l/min.m}^2 * 160 \text{ min} * 1,96 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 79,96 \text{ l.}$$

$$255 \text{ l/min.m}^2 * 660 \text{ min} * 1,96 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 329,86 \text{ l.}$$

$$255 \text{ l/min.m}^2 * 1200 \text{ min} * 1,96 * 10^{-3} \text{ m}^2 = 599,76 \text{ l.}$$

Con los datos de la tabla 21, se procede a elaborar la tabla 22, colocando la profundidad del lecho en orden ascendente con su respectivo tiempo de ruptura, y, a partir de esta tabla se realiza la Figura 35.

Tabla 22. Resultado a partir de Tabla 21.

Profundidad del lecho, cm	Tiempo t, min
60	160
70	150
80	100
120	660
140	460
160	380
180	1.200
210	840
320	800

Fuente: Elaboración propia.

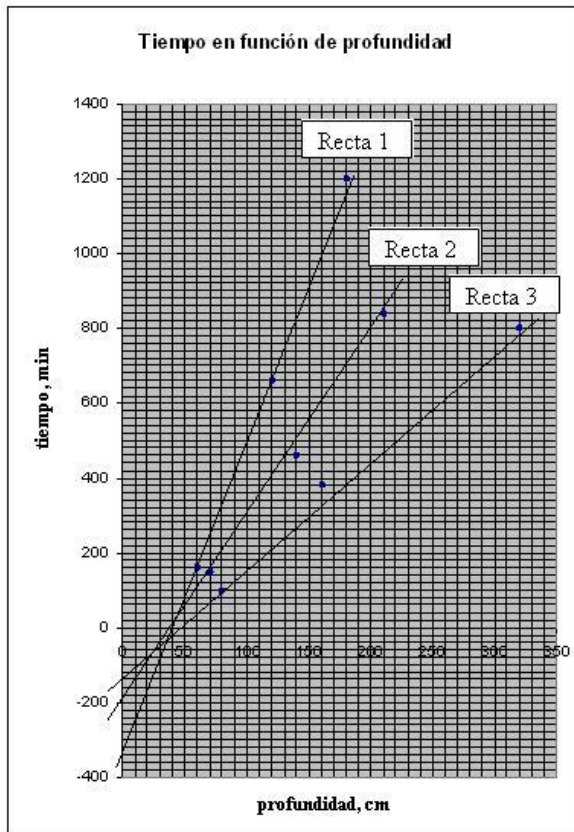


Figura 35. Representación de datos Tabla 22
Fuente: Elaboración propia.

Los tres datos experimentales del tiempo de ruptura y la profundidad del lecho de carbón, prueba A, tabla 21, al ser graficados, resulta la recta 1; es decir, que a mayor profundidad de lecho, el tiempo al que se satura el carbón es mayor, resultando un mayor volumen de agua residual tratada.

Los tres datos experimentales de tiempo de ruptura y profundidad del lecho de carbón, prueba B, tabla 21, al ser graficados resulta la recta 2, donde también se cumple, que a mayor profundidad de lecho, el tiempo en que se satura el carbón es mayor, resultando un mayor volumen de agua residual tratada.

Los tres datos experimentales de tiempo de ruptura y profundidad del lecho de carbón, prueba C, tabla 21, al ser graficados, dan como resultado la recta 3, donde también se cumple que a mayor profundidad de lecho, el tiempo al que se satura el carbón es mayor, resultando un mayor volumen de agua residual tratada.

Este gráfico servirá de base para cálculos posteriores como: pendiente de las rectas, valor de intersección de las rectas con las ordenadas, etc.

3.4.3. Cálculo de velocidad, v ; pendiente, S y capacidad de adsorción, N_0

v (VELOCIDAD)

Velocidad prueba A = $255 \text{ l/min.m}^2 * 1\text{m}^3/1000 \text{ l} * 100 \text{ cm/m} = 25,5 \text{ cm/min}$.

Velocidad prueba B = $382 \text{ l/min.m}^2 = 38,2 \text{ cm/min}$.

Velocidad prueba C = $510 \text{ l/min.m}^2 = 51,0 \text{ cm/min}$.

PENDIENTE S

A las rectas 1, 2 y 3, de la Figura 35, se les calculan las pendientes, S , cuyos valores serán utilizados en el cálculo de la capacidad de adsorción, N_0 .

Pendiente recta 1, $S_1 = (1.000 - 200) / (160 - 70) = 8,88 \text{ min/cm}$.

Pendiente recta 2, $S_2 = (800 - 200) / (210 - 80) = 4,61 \text{ min/cm}$.

Pendiente recta 3, $S_3 = (800 - 200) / (300 - 110) = 3,15 \text{ min/cm}$.

CAPACIDAD DE ADSORCIÓN, N_0

$N_0 = C_0 v S$ (Ramalho, 2003).

N_0 PRUEBA A = $393 \text{ mg/l} * 1 \text{ l}/1.000 \text{ cm}^3 * 25,5 \text{ cm/min} * 8,88 \text{ min/cm}$
= 89 mg/cm^3 .

N_0 PRUEBA B = $393 \text{ mg/l} * 1 \text{ l}/1.000 \text{ cm}^3 * 38,2 \text{ cm/min} * 4,61 \text{ min/cm}$
= $69,2 \text{ mg/cm}^3$.

N_0 PRUEBA C = $393 \text{ mg/l} * 1 \text{ l}/1.000 \text{ cm}^3 * 51,0 \text{ cm/min} * 3,15 \text{ min/cm}$
= $63,13 \text{ mg/cm}^3$.

Los resultados de los cálculos de velocidad, v , pendiente de las tres rectas, S , y capacidad de adsorción, N_0 , están tabulados en la tabla 23.

Tabla 23. Velocidad, pendiente y capacidad de adsorción de las tres pruebas.

Prueba	Carga hidráulica, l/min.m ²	Velocidad, v cm/min	Pendiente, S min/cm	Capacidad de adsorción, No mg/cm ³
A	255	25,5	8,88	89,00
B	382	38,2	4,61	69,20
C	510	51,0	3,15	63,13

Fuente: Elaboración propia.

3.4.4. Cálculo de la constante de velocidad de adsorción, k, altura crítica del lecho, D_o , intersección de las rectas de la Figura 21 Con la ordenada, i.

INTERSECCIONES DE LAS RECTAS DEL FIGURA 35 CON LA ORDENADA y, i.

VALOR DE LA INTERSECCIÓN DE LAS RECTAS, i.

i = valor leído en la ordenada de la Figura 35

VALOR DE LA INTERSECCIÓN DE LA RECTA 1

i = 340

VALOR DE LA INTERSECCIÓN DE LA RECTA 2

i = 200

VALOR DE LA INTERSECCIÓN DE LA RECTA 3

i = 140

CONSTANTE DE VELOCIDAD DE ADSORCIÓN, K

$$K = -\ln [(C_o/C_e) - 1]/iC_o$$

$C_o = 393 \text{ mg/l} = 0,393 \text{ mg/cm}^3$ (concentración inicial del agua residual)

$C_e = 236 \text{ mg/l} = 0,236 \text{ mg/cm}^3$ (concentración de equilibrio)

CONSTANTE DE VELOCIDAD DE ADSORCIÓN, K, PARA LA PRUEBA A

para i = 340

$$K = -\ln [(393/236) - 1]/340(0,393)$$

$$-\ln [(393/236) - 1] = 0,415$$

$$K = 0,415/340(0,393)$$

$$K = 0,00310 \text{ cm}^3/\text{mg.min}$$

CONSTANTE DE VELOCIDAD DE ADSORCIÓN, K, PARA LA PRUEBA B

para i = 200

$$K = 0,415/200(0,393) = 0,00528 \text{ cm}^3/\text{mg.min}$$

CONSTANTE DE VELOCIDAD DE ADSORCIÓN, K, PARA LA PRUEBA C

para i = 140

$$K = 0,415/140(0,393) = 0,00754 \text{ cm}^3/\text{mg.min}$$

ALTURA CRÍTICA DEL LECHO, D_o

$$D_o = (v/KN_o) \ln [(C_o/C_e) - 1]$$

ALTURA CRÍTICA DEL LECHO, D_o , PARA LA PRUEBA A

v = 25,5 cm/min

$$k = 0,00310 \text{ cm}^3/\text{mg}\cdot\text{min}$$

$$N_0 = 89 \text{ mg}/\text{cm}^3$$

$$-\ln [(C_0/C_E) - 1] = 0,415$$

$$D_0 = (25,5/0,00310 (89)) (0,415) = 38,35 \text{ cm}$$

ALTURA CRÍTICA DEL LECHO, D_0 , PARA LA PRUEBA B

$$v = 38,2 \text{ cm}/\text{min}$$

$$k = 0,00528 \text{ cm}^3/\text{mg}\cdot\text{min}$$

$$N_0 = 69,2 \text{ mg}/\text{cm}^3$$

$$-\ln [(C_0/C_E) - 1] = 0,415$$

$$D_0 = (38,2/0,00528 (69,2)) (0,415) = 43,39 \text{ cm}$$

ALTURA CRÍTICA DEL LECHO, D_0 , PARA LA PRUEBA C

$$v = 51,0 \text{ cm}/\text{min}$$

$$k = 0,00754 \text{ cm}^3/\text{mg}\cdot\text{min}$$

$$N_0 = 63,13 \text{ mg}/\text{cm}^3$$

$$-\ln [(C_0/C_E) - 1] = 0,415$$

$$D_0 = (51/0,00754 (63,13)) (0,415) = 44,46 \text{ cm}$$

Los resultados de los cálculos de la constante de velocidad de adsorción, K , altura crítica del lecho, D_0 ; y las lecturas de la intersección de las rectas con la Figura 35, i , están tabulados en la tabla 24.

Tabla 24. Resultados de la investigación con las variables de diseño.

Prueba	Carga hidráulica, $l/\text{min}\cdot\text{m}^2$	Velocidad, v cm/min	Capacidad de adsorción, N_0 mg/cm^3	i	Constante de velocidad de adsorción, k $\text{cm}^3/\text{mg}\cdot\text{min}$	Altura crítica del lecho, D_0 , cm
A	255	25,5	89,00	340	0,00310	38,35
B	382	38,2	69,20	200	0,00528	43,39
C	510	51,0	63,13	140	0,00754	44,46

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 24 se presenta el resultado de la investigación y todas las variables de diseño, obtenidas a partir de las corridas experimentales realizadas en el experimento 3, y las pruebas A, B y C, a partir de las cuales, se obtendrán los gráficos tipo patrón, según el esquema propuesto por Ramalho (página 599), graficando las distintas variables en función de la carga hidráulica utilizada.

3.4.5. Representación gráfica de la capacidad de adsorción, q , constante de velocidad de adsorción, k , altura crítica del lecho, D_0 , en función de la carga hidráulica.

3.4.5.1. Representación gráfica de la carga hidráulica vs altura crítica del lecho, D_0

Con los datos de la tabla 24, la carga hidráulica y la altura crítica del lecho, D_0 , registrados en la tabla 25, se obtiene la Figura 36.

Tabla 25. Carga hidráulica y altura crítica del lecho.

Carga hidráulica, $l/min.m^2$	Altura crítica del lecho, D_0 , cm
0	0
255	38,35
382	43,39
510	44,46

Fuente: Elaboración propia.

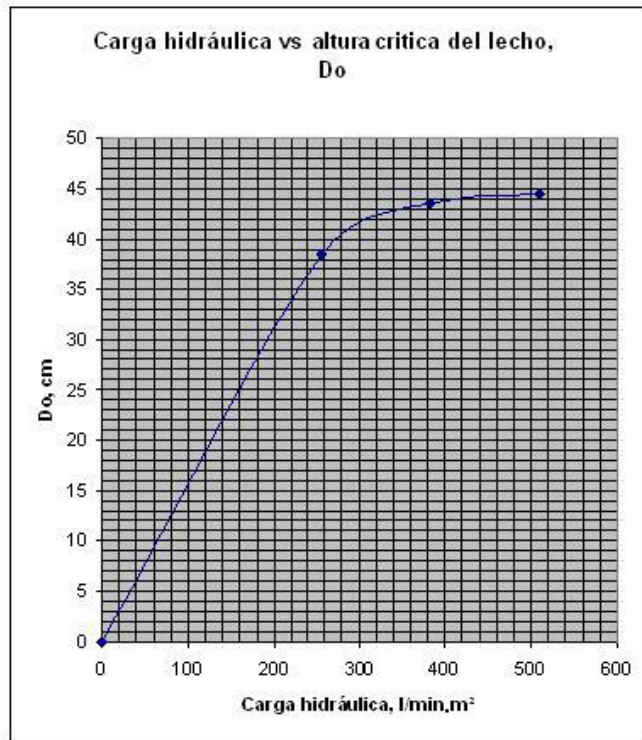


Figura 36. Representación de datos Tabla 25
Fuente: Elaboración propia.

Este es el primer gráfico patrón, sugerido por Ramalho, en el cual se aprecia que a medida que aumenta la carga hidráulica, va incrementándose la altura crítica del lecho, D_o , hasta llegar a una carga hidráulica de 500 l/min.m², en donde la altura crítica del lecho se hace constante, es decir que no varía aunque se aumente la carga hidráulica, lo cual es una señal de que el lecho de carbón está saturado.

3.4.5.2. Representación gráfica de la carga hidráulica vs constante de velocidad de adsorción, k

Con los datos de la tabla 24, carga hidráulica y constante de velocidad de adsorción, K , registrados en la tabla 26, se obtiene la Figura 37.

Tabla 26. Carga hidráulica y Constante de velocidad de adsorción.

Carga hidráulica, l/min.m ²	Constante de velocidad de adsorción, K cm ³ /mg.min
255	0,00310
382	0,00528
510	0,00754

Fuente: Elaboración propia.

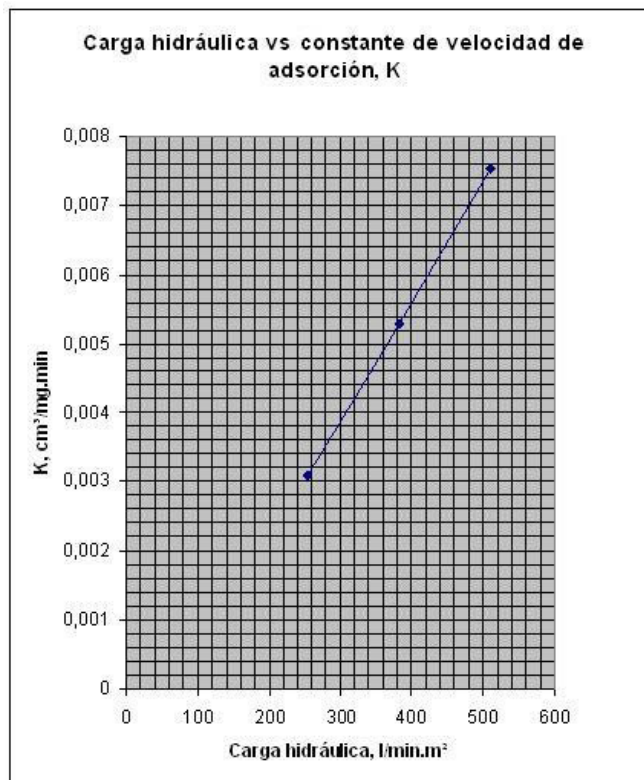


Figura 37. Representación de datos Tabla 26

Fuente: Elaboración propia.

Este es el segundo gráfico patrón, sugerido por Ramalho, en el cual se aprecia que a medida que aumenta la carga hidráulica, va incrementándose casi linealmente la constante de velocidad de adsorción, K; es decir que a mayor carga hidráulica, mayor es el valor de la constante de velocidad de adsorción, K.

Representación gráfica de la carga hidráulica vs capacidad de adsorción, N_0

Con los datos de la tabla 24, carga hidráulica y capacidad de adsorción, N_0 , registrados en la tabla 27, se obtiene la Figura 38.

Tabla 27. Carga hidráulica y capacidad de adsorción.

Carga hidráulica, $l/min.m^2$	Capacidad de adsorción, N_0 mg/cm^3
255	89,00
382	69,20
510	63,13

Fuente: Elaboración propia.

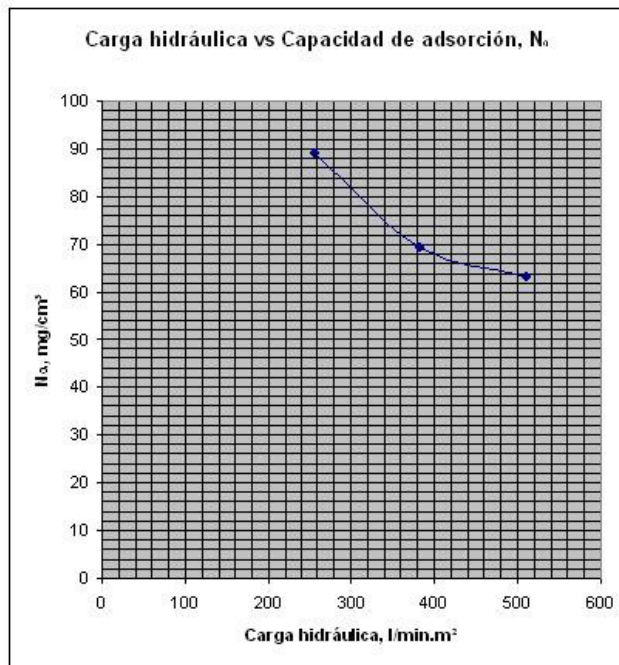


Figura 38. Representación de datos Tabla 27

Fuente: Elaboración propia.

Este es el tercer gráfico patrón, sugerido por Ramalho, en el que se aprecia que a medida que aumenta la carga hidráulica, disminuye la capacidad de adsorción, N_0 , hasta llegar a una carga hidráulica de $500 l/min.m^2$, en que la capacidad de adsorción se hace constante; es decir que no varía aunque se aumente la carga hidráulica, lo cual es una señal de que la capacidad de adsorción del lecho de carbón es cero y se encuentra saturado.

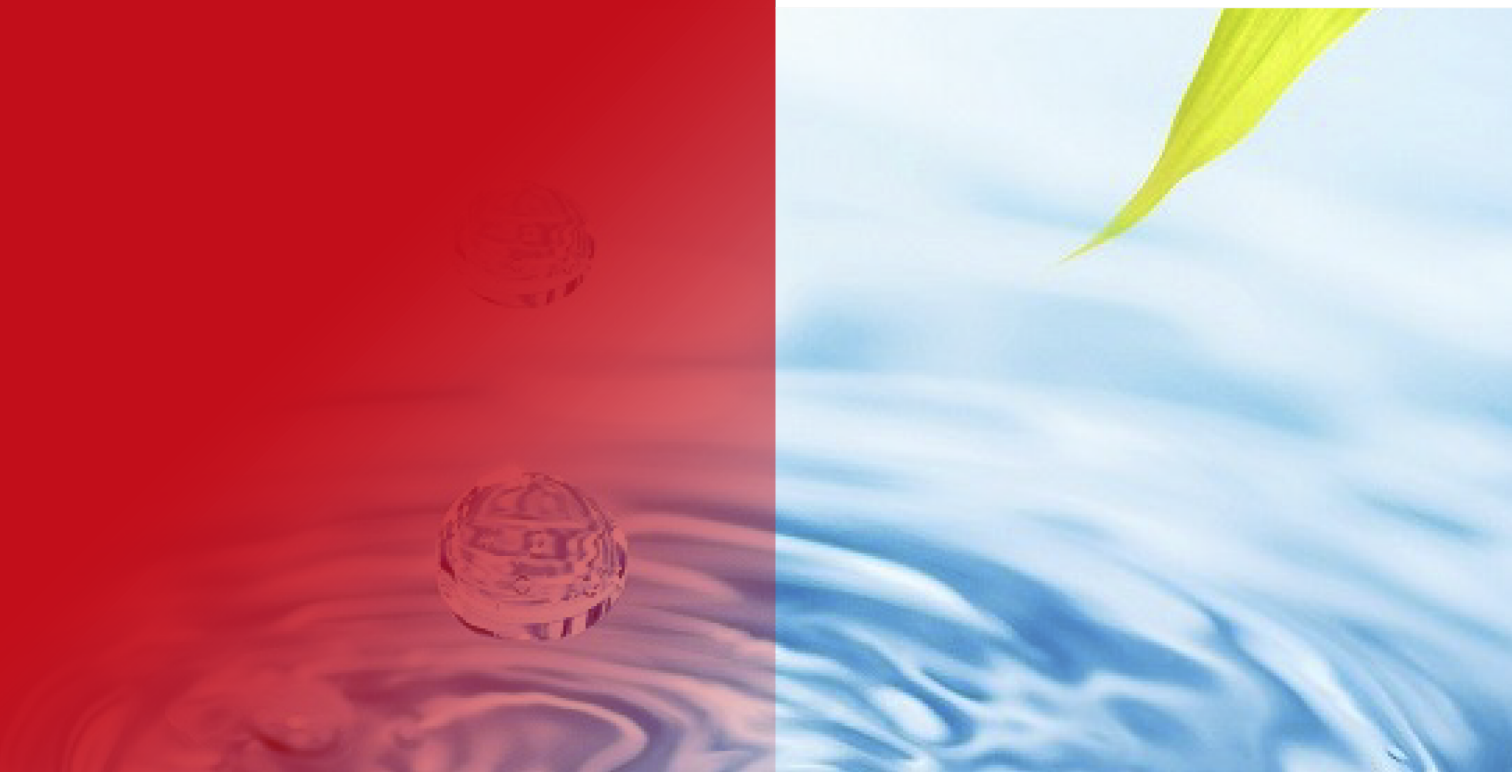
En resumen, la tabla 24 y las Figuras patrón: 36, 37 y 38, constituyen el resultado de toda la investigación realizada en las columnas de laboratorio, habiéndose obtenido las siguientes variables de diseño:

- Capacidad de adsorción, N_0 , expresada en: mg/cm^3 .
- Altura crítica del lecho, D_0 , expresada en: cm .
- Constante de velocidad de adsorción, K , expresada en: $\text{cm}^3/\text{mg}\cdot\text{min}$.

Estas variables de diseño y los gráficos patrón, pueden servir de base para el diseño de una planta de tratamiento con carbón activado granular Darco 12 x 20 de NORIT, para un agua residual proveniente de una industria textil.

CAPÍTULO IV

CASOS PRÁCTICOS DE
DISEÑO



4. CASOS PRÁCTICOS DE DISEÑO

4.1. PROCESO DISCONTINUO, "BACTH"

4.1.1. Aplicación de la ecuación de la isoterma de Freundlich a un diseño a escala industrial

Una planta textil produce 160 m³/d de agua residual con una DQO inicial de 281 mg/l. Se desea reducir la DQO a 90 mg/l, mediante un proceso discontinuo de adsorción, usando carbón activado granular Darco 12 x 20. Si el tiempo de contacto para la remoción es de 24 horas, determinar el volumen del carbón y volumen requerido del reactor.

SOLUCIÓN:

Cálculo de la dosis requerida de carbón:

La ecuación de la isoterma de Freundlich, determinada experimentalmente es:

$$X/m = 1,2 (10^{-8} C^{2,594})$$

$$m = X/1,2 (10^{-8} C^{2,594})$$

$$x = C_0 - C$$

$$C_0 = 281 \text{ mg/l}$$

$$C = 90 \text{ mg/l}$$

$$m = (281 - 90)/1,2 (10^{-8} (90)^{2,594})$$

$$m = 136039 \text{ mg/l} = 136 \text{ g/l.}$$

Cálculo de la cantidad diaria de carbón:

Masa diaria de carbón = concentración del carbón x caudal

$$X = 136 \text{ g/l}$$

$$Q = 160 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{Masa diaria de carbón} = (136 \text{ g/l})(160 \text{ m}^3/\text{d})(1000 \text{ lt/m}^3)(1 \text{ kg}/1000\text{g})$$

$$\text{Masa diaria de carbón} = 21760 \text{ kg/d.}$$

Cálculo del volumen diario del carbón:

La densidad del carbón Darco 12 x 20 es de 370 kg/m³ (dato suministrado por el fabricante).

$$\text{Volumen diario de carbón} = 21760 \text{ kg/d}/370 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Volumen diario de carbón} = 58,81 \text{ m}^3/\text{d.}$$

Cálculo del volumen del reactor:

$$\text{Volumen del reactor} = (160 \text{ m}^3/\text{d})(1 \text{ d}) = 160 \text{ m}^3$$

4.2. PROCESO CONTINUO

4.2.1. Cálculo de la capacidad teórica de adsorción del carbón activado granular Darco 12 x 20

La Figura 29 de la Isoterma de Freundlich, permite obtener directamente la cantidad de materia adsorbida por unidad de masa utilizada de carbón activado, una vez alcanzado el equilibrio a una determinada concentración inicial, C_0 , del agua residual. Por ejemplo, para una concentración inicial de agua residual $C_0 = 281$ mg/l.

$$X/m = 0,024 \text{ g/g (g de sustancia adsorbida por g de carbón utilizado).}$$

También se puede utilizar la ecuación mencionada, determinada experimentalmente, para la determinación de la capacidad teórica de adsorción

$$\begin{aligned} X/m &= 1,2 \times 10^{-8} C^{2,594} \\ X/m &= 1,2 \times 10^{-8} (281)^{2,594} \\ X/m &= 0,026 \text{ g/g} \end{aligned}$$

4.2.2. Determinación del tiempo de agotamiento en una columna de laboratorio con capacidad teórica de adsorción usando la isoterma de Freundlich

Si se toma como ejemplo, la determinación del tiempo de agotamiento de una columna de laboratorio que contiene carbón activado granular Darco 12 x 20, y alimenta agua residual de la industria textil, a un caudal de 30 l/h, con una concentración inicial de $C_0 = 281$ mg/l, si se desea alcanzar una concentración de equilibrio de $C_E = 90$ mg/l.

$$t_b = [(x/m)_b M_c] / Q[C_i - (C_b/2)]$$

t_b = tiempo hasta el agotamiento, d

$(X/m)_b$ = capacidad de adsorción de agotamiento

M_c = masa de carbón contenido en la columna

Q = caudal, m³/d

C_i = concentración de materia orgánica a la entrada de la columna, mg/l

C_b = concentración de materia orgánica al producirse el agotamiento, mg/l

Caudal = 30 l/h

$C_0 = 281$ mg/l

$C_E = 90$ mg/l

Según Metcalf y Eddy, se puede asumir como valor de la capacidad de adsorción de agotamiento, un valor aproximado entre el 25 y 50 por 100 de la capacidad teórica de

adsorción; entonces:

$(X/m)_b = 0,5$ de la capacidad teórica de adsorción (0,024 determinada experimentalmente)

$$(X/m)_b = (0,5)(0,024) = 0,012 \text{ mg/mg}$$

Diámetro de la columna construida: 5 cm = 0,05 m

Área: $\pi d^2/4$

$$A = 0,00196 \text{ m}^2$$

Densidad del carbón Darco 12 x 20: 370 kg/m³

M_c = masa contenida de carbón en la columna

Cuando la profundidad del lecho de carbón es: 60 cm = 0,6 m

$$M_c = (0,00196 \text{ m}^2)(0,6 \text{ m})(370 \text{ kg/m}^3) = 0,435 \text{ kg.}$$

Caudal = 30 l/h = 0,03 m³/h

$$t_b = \frac{(0,012 \text{ mg/mg})(0,435 \text{ kg})(1000 \text{ g/kg})(1000 \text{ mg/g})}{(0,03 \text{ m}^3/\text{h}) [281 - (90/2)] \text{ mg/l} \times 1000 \text{ l/m}^3}$$

$$t_b = 0,73 \text{ h} = 44,23 \text{ min}$$

4.2.3. Aplicación de los gráficos obtenidos en las pruebas experimentales a un diseño a escala industrial

Del agua residual utilizada en las pruebas experimentales, se trata de disminuir la DQO desde 393 hasta una concentración de 236 mg/l en un lecho de carbón activado de 0,40 m de diámetro y una profundidad de 1,0 m; el caudal es 3,5 m³/h. Calcular:

- 1) El tiempo de servicio, h
- 2) El volumen utilizado de carbón, m³
- 3) La eliminación de soluto, kg
- 4) El rendimiento de la adsorción basado en la capacidad de adsorción, N_0 , y altura crítica del lecho, D_0 , %.

SOLUCIÓN

Cálculo del tiempo de servicio

$$\text{Caudal} = (3,5 \text{ m}^3/\text{h})(1000 \text{ l/m}^3)(1 \text{ h}/60 \text{ min}) = 58,33 \text{ l/min}$$

$$\text{Área de la columna, } A = \pi d^2/4$$

$$d = 0,40 \text{ m}$$

$$\text{Área} = 3,14 \times (0,4)^2/4 = 0,125 \text{ m}^2$$

$$\text{Carga hidráulica} = 58,33 \text{ l/min}/0,125 \text{ m}^2 = 466,64 \text{ l/min.m}^2$$

$$V = (466,64 \text{ l/min.m}^2)(1 \text{ m}^3/1000 \text{ l})(100 \text{ cm/m}) = 46,66 \text{ cm/min}$$

Con la carga hidráulica = 466,64 l/min.m², el valor de la constante de la velocidad de adsorción, K

$$K = 0,0067 \text{ cm}^3/\text{mg.min}$$

Con la carga hidráulica = 466,64 l/min.m², el valor de la capacidad de adsorción, N₀

$$N_0 = 65 \text{ mg/cm}^3$$

$$t = (N_0/C_0 v) D - \ln [(C_0/C_E) - 1]/kC_0$$

$$C_0 = 393 \text{ mg/l}$$

$$C_E = 236 \text{ mg/l}$$

$$(N_0/C_0 v) D = [(65 \text{ mg/cm}^3/0,393 \text{ mg}) (46,66 \text{ cm/min})] 100 \text{ cm} = 354,46 \text{ min}$$

$$\ln [(C_0/C_E) - 1] = \ln [(393/236) - 1] = \ln (0,66) = -0,415$$

$$- \ln [(C_0/C_E) - 1]/kC_0$$

$$0,415/(0,0067 \text{ cm}^3/\text{mg.min}) (0,393 \text{ mg/cm}^3) = 157,6 \text{ min}$$

$$t = 354,46 + 157,6 = 512,06 \text{ min} = 8,53 \text{ horas.}$$

Cálculo del volumen del carbón

$$\text{Volumen} = (\pi d^2/4) h = ((3,1416 (0,4)^2/4)) 1,0 = 0,125 \text{ m}^3$$

Cálculo de la eliminación de soluto

$$\text{Volumen de agua residual tratada} = (3,5 \text{ m}^3/\text{h}) \times 8,53 \text{ h} = 29,85 \text{ m}^3$$

$$C_o = 393 \text{ mg/l} = 0,393 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa del soluto en el afluente} = \text{Volumen} \times C_o$$

$$(29,85 \text{ m}^3) (0,393 \text{ kg/m}^3) = 11,73 \text{ kg}$$

$$\text{Masa del soluto en el efluente} = \text{Volumen} \times C_E$$

$$(29,85 \text{ m}^3) (0,236 \text{ kg/m}^3) = 7,04 \text{ kg}$$

Masa del soluto eliminado

$$\text{Masa del soluto en el afluente} - \text{masa del soluto en el efluente}$$

$$11,73 - 7,04 = 4,69 \text{ kg.}$$

Cálculo de la eliminación teórica de soluto

Usando el valor de la capacidad de adsorción, N_o

$$N_o = 65 \text{ mg/cm}^3 = 65 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masa} = N_o * \text{Volumen de carbón} = (65 \text{ kg/m}^3) (0,125 \text{ m}^3) = 8,125 \text{ kg}$$

Cálculo de rendimiento de la adsorción

$$\text{Rendimiento} = (\text{kg eliminados de soluto}/\text{kg eliminados teóricos de soluto}) * 100$$

$$\text{Rendimiento} = (4,69/8,12) (100) = 57,75 \%$$

Otra forma de calcular el rendimiento de la adsorción es utilizando la fórmula establecida por Ramalho (página 602, Tratamiento de Aguas Residuales)

$$\frac{(D - D_0)}{D} \cdot 100$$

D = profundidad o altura del lecho de carbón activado

$$D = 100 \text{ cm}$$

D_0 = altura crítica del lecho

De la Figura 36, se lee en la ordenada, el valor de D_0 , con la carga hidráulica de 466,64 l/min.m², se determina el siguiente valor:

$$D_0 = 44 \text{ cm}$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{(100 - 44)}{100} \cdot 100 = 56\%$$

El valor del rendimiento del proceso calculado por los dos métodos es aproximadamente igual, siendo un valor aceptable para este tipo de operación.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Aguapedia. (2000). Manual del Carbón Activado. Sevilla, España: E. U. Politécnica. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>
- Babor, J. A., & Ibarz Aznárez, J. (1963). Química General Moderna. México: Editora Nacional. doi:185
- Bermeo, M. (2017). Tratamiento de Aguas Residuales: Técnicas Convencionales (Segunda Edición ed.). Guayaquil: Grupo Compas.
- Bonilla, L. (2005). Tratamiento de aguas residuales utilizando carbón activado: Estudio a escala de laboratorio. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Burns, R. A. (1996). Fundamentos de Química (Segunda ed.). México: Compañía Editorial Ultra S.A.
- Clarimex. (2000). Clasificación del carbón activado. Obtenido de <http://activatedcarbon.com.mx/es/clasificacion-del-carbon-activado/>
- Clarimex. (2000). Proceso de Activación. Obtenido de Activación: <http://activatedcarbon.com.mx/es/procesos-de-activacion/>
- Clarimex. (2000). Purificación en fase líquida. (Clarimex, Editor) Obtenido de <http://activatedcarbon.com.mx/es/purificacion-en-fase-liquida/>
- Cuido el Agua. (2009). Cuidoelagua.org. Obtenido de <http://www.cuidoelagua.org/empapate/aguaresiduales/nivelestratamiento.html>
- DICA. (2000). Dicafil. Obtenido de <http://www.dicafil.com.ar/carbon.htm>
- Hernandez, J. (2002). Scribd. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/313949459/Tarea-2-Escala-de-Tamices-Tamizado>
- Huecas Ayala, J. C. (2013). Guías técnicas y económicas para la selección y diseño de plantas de Tratamiento de Agua. Mexico D.F.: Instituto Politécnico Nacional.
- Metcalf, & Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización. Mc. Graw-Hill.
- Miranda, O. M., & Villamizar, S. R. (2006). Aprovechamiento de los residuos de la Industria Palmera mediante la obtención de carbón activado a escala laboratorio. Universidad Industrial de Santander.
- Perry, J. H. (1976). Manual del Ingeniero Químico. Mexico: Unión Tipográfica Hispanoamericana.
- Ramalho, R. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona, España: Mc. Graw-Hill.
- Romero Rojas, J. (2000). Purificación de Agua. Colombia: Escuela Colombiana.
- Tejero, S. T. (1992). depuracion de Aguas Residuales. Madrid: c.
- TextosCientíficos. (2005). TextosCientíficos.com. Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/fuerzas-intermoleculares>
- Vanderbilt University. (29 de Marzo de 1976). Development of Design Criteria for Wastewater Treatment Processes, Department of Environmental and Water Resources Engineering and Center for Environmental Quality Management. Vanderbilt University.

- Wesley Eckenferder, J. (2000). Industrial Water Pollution Control. McGraw-Hill.

6. GLOSARIO DE TÉRMINOS

ADSORBATO	Son sustancias adsorbidas por un carbón activado u otro material adsorbente.
ADSORBENTE	Material como el carbón activado, en el que se verifica el fenómeno de la adsorción.
ADSORCIÓN	Adhesión de un estrato finísimo de moléculas, líquidas o gaseosas, a la superficie de sólidos (por ejemplo, carbón activado).
ALTURA DEL LECHO	Espesor de carbón expresado en unidades de longitud, paralelo al flujo de la corriente fluida, a través del cual el fluido pasa.
ALTURA CRÍTICA DEL LECHO	En un sistema de columnas de carbón, es el estrato de carbón granular que queda saturado sólo parcialmente y se coloca en la zona intermedia entre el carbón completamente saturado y el carbón todavía fresco. En el caso de una columna única, se trata de aquella parte del carbón empleado que no llega a saturarse completamente.
AREA SUPERFICIAL	Es la cantidad de superficie referida al conjunto de los poros del carbón. Se la determina con base a una isoterma de adsorción del ázoe, según el método de Brunauer, Emmett y Teller (BET). Se expresa en m ² /g.
AZUL DE METILENO (ÍNDICE DEL...)	Se lo define como el número de mililitros de una solución estándar (0,15%) de azul de metileno, decolorados por 0,1 gramos de carbón activado.
BREAK-POINT	Es el momento en el que, en condiciones operativas específicas, una cantidad significativa de adsorbato empieza a desprenderse del efluente de una columna de carbón activado.
BREAK-THROUGH	Momento en que, en el efluente de una columna de carbón activado, el adsorbato alcanza una concentración preestablecida.
BREAK-THROUGH (CAPACIDAD DE...)	Cantidad de adsorbato que el carbón contiene en el momento en que se alcanza el break-through.

BREAK-THROUGH (CURVA DE...)	Relación entre el volumen de líquido o gas tratado en una columna de carbón y la concentración o presión parcial del componente separado.
BREAK-THROUGH (TIEMPO DE...)	Tiempo que se tarda en alcanzar el break-point o break-through.
BORDE LIBRE	Es la distancia comprendida entre el extremo de una columna de adsorción y la superficie libre del carbón.
CALOR DE ADSORCIÓN	Calor que se desarrolla al ser adsorbidas las moléculas.
CALOR ESPECÍFICO	Es la cantidad de calor por unidad de masa necesario para elevar en 1°C la temperatura de una sustancia (carbón granulado).
CAPACIDAD DE TRABAJO	Es la cantidad de adsorbato que puede ser desorbida, o sea la cantidad que puede ser reabsorbida por un carbón activado tras reactivación.
CARBÓN ACTIVADO (CARBÓN ACTIVO)	Carbón que ha sido “activado” a temperatura alta mediante el calentamiento con vapor de agua y anhídrido carbónico o agentes deshidratantes, lo que da lugar a una estructura porosa interna enormemente desarrollada. El área superficial de un carbón activado es del orden de los 1000 m ² /g.
CARBÓN DE REPOSICIÓN O REINTEGRO	Carbón activado fresco que hay que añadir al finalizar un ciclo de reactivación para compensar las pérdidas derivadas del proceso regenerativo.
CARBÓN LAVADO	Carbón que ha sido sometido a la acción de una solución ácida a fin de disolver las cenizas en él contenidas.
CARGA HIDRÁULICA	Cantidad específica que fluye a través de una columna, expresada como razón del caudal por unidades de superficie (ej: [m ³ /h]/[m ²]).
CENIZAS	Contenido mineral del carbón activado. Se definen normalmente en porcentaje de la masa de la muestra calcina-

da con respecto a la muestra que se examina.

- COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD** Se obtiene dividiendo la apertura en milímetros de la malla del cedazo por el que consigue pasar el 60% de la masa de una muestra de carbón, entre la apertura en milímetros de la malla que sólo deja pasar el 10%. Este valor se obtiene por interpolación de una curva de distribución granulométrica.
- COLUMNA DE CARBÓN** Una columna rellena con carbón activado granulado cuya función primaria es la adsorción preferente de tipos de moléculas específicos.
- COLUMNAS EN PARALELO** Un proceso de adsorción en el que el fluido para ser tratado es subdividido en dos o más corrientes separadas y a cada una de estas corrientes se la trata en una columna diferente.
- COLUMNAS EN SERIE** Sistema en el que el efluente de una primera columna alimenta una segunda columna; el efluente de la segunda alimenta una tercera columna, etc.
- CONTRACORRIENTE (OPERACIÓN EN...)** Cualquier proceso de adsorción en el que el flujo de la fase líquida para ser tratado y flujo del sólido adsorbente van contrarias. La mayor concentración de orgánicos dispersos es puesta en contacto con la porción más saturada del adsorbente, mientras que el material más fresco es puesto únicamente en contacto con la concentración de sustancias orgánicas más baja. La utilidad de este proceso es la de aprovechar al máximo, la capacidad de adsorción del material adsorbente hasta alcanzar su completa saturación.
- CONTRALAVADO** Proceso mediante el cual el agua se ve forzada a atravesar un lecho en dirección opuesta a la normal del flujo de trabajo, generalmente de abajo a arriba. Durante el contralavado, el lecho se expande permitiendo la eliminación del material filtrado que anteriormente había sido contenido de manera mecánica (sólidos suspendidos).
- COT** Nombre de la medida de la cantidad de compuestos orgánicos contenidos en una muestra de agua, expresada en mg/l de carbono. Se la determina con un analizador

de carbono Beckman u otro instrumento, en el que los compuestos orgánicos sean oxidados catalíticamente con CO₂, y medidos con infrarrojos. Este método, se aplica con frecuencia a las aguas de vertido.

- DBO₅ Es la medida de la concentración de las impurezas orgánicas, aplicada normalmente a las aguas de vertidos. Representa la cantidad de oxígeno expresada en mg/l, requerida por las bacterias para llevar a término la estabilización de las sustancias orgánicas en condiciones aeróbicas (generalmente en el tiempo de cinco días).
- DENSIDAD APARENTE Es la masa por unidad de volumen de una masa homogénea de carbón activado. Para asegurar la sedimentación uniforme del carbón granulado en el cilindro medidor, se utiliza un sistema de alimentación mediante tolvas vibrantes.
- DENSIDAD DEL LECHO LAVADO Y DRENADO Es la masa por unidad de volumen, sobre base seca, de un lecho de carbón activado que ha sido contralavado y drenado. Este valor es por lo general, más bajo que la correspondiente densidad aparente; ello se debe a que durante el contralavado tiene lugar una clasificación basada en las dimensiones de las partículas.
- DENSIDAD REAL Es la densidad del esqueleto de una partícula de carbón. Queda determinada por el desplazamiento de volúmenes de aire, en el interior de la estructura porosa, con helio o con mercurio. Normalmente se aproxima a la del grafito.
- DESORCIÓN (O DESADSORCIÓN) Es lo opuesto a la adsorción. Es un fenómeno en el que las moléculas adsorbidas abandonan la superficie del material adsorbente.
- DIÁMETRO MEDIO DE LAS PARTÍCULAS Corresponde a la media, pesada, de las dimensiones de los granos de un carbón granulado. Puede obtenerse a partir de un análisis de cribado, multiplicando la masa de cada uno de los fragmentos por el correspondiente diámetro medio de los granos. La adición de los varios sumandos, se confronta por último, con la masa total de la muestra. El diámetro medio de cada uno de los fragmentos es la dimensión intermedia entre la apertura

de la malla del cedazo a través del cual el fragmento ha pasado y la del cedazo en el que el fragmento ha quedado atrapado.

- DISTRIBUCIÓN DE LOS POROS** Es una medida de la estructura de los poros que confieren a los carbones activados su característica capacidad adsorbente. Se la puede representar de dos maneras: -por distribución integral, que especifica la relación entre las dimensiones de los poros (el radio o diámetro) y el volumen total de todos los poros superiores o inferiores a dicha dimensión; -por distribución derivada, que indica la cantidad asociada de volumen a los poros cuya dimensión esté comprendida entre dos valores específicos. Analíticamente, la distribución de los microporos, se calcula para adsorción con ázoe, mientras los macroporos, se determinan con el auxilio de un porosímetro de mercurio. La distribución de los microporos puede utilizarse para prever la capacidad de adsorción de sustancias con peso molecular distinto. La distribución de los macroporos puede ponerse en correlación con la velocidad de adsorción, importante para ciertas aplicaciones.
- DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA** Se obtiene haciendo pasar una cantidad pesada de muestra a través de una serie de cedazos de laboratorio en sobreposición. Es el conjunto de las pesadas atrapadas en cada cedazo.
- DQO** Es la medida de la concentración de material orgánico presente en una solución. Representa la cantidad de oxígeno expresada en mg/l, necesaria para la oxidación completa de las sustancias orgánicas presentes (incluidos anhídrido carbónico y agua) mediante un potente agente oxidante y dado particulares condiciones de acidez.
- DUREZA** Es la medida de la resistencia de un carbón granulado a la acción degradante obtenida con esferas de acero en un molino de tambor rotante. Se calcula pesando la cantidad de carbón atrapada en la malla de un determinado cedazo tras haber pulverizado el carbón. Se expresa en porcentaje respecto de la cantidad inicial.
- EFFECTIVE SIZE** Es la medida de la malla del cedazo que permite el paso del 10% del peso del carbón sometido a cribado, pero que

atrapa al 90% restante. Se determina por interpolación de una curva de distribución granulométrica.

EXPANSIÓN DEL LECHO CONTRALAVADO	Es la expansión que se produce cuando un lecho filtrante es sometido a contralavado. Se expresa normalmente en porcentaje respecto de la altura del lecho contralavado y drenado.
GRANULOMETRÍA	Se expresa normalmente en mesh, que indica las medidas de cedazo entre las que el carbón puede respectivamente, pasar o quedar atrapado.
ÍNDICE DE YODO	Es la cantidad de yodo (mg) adsorbida por un gramo de carbón en polvo, cuando la concentración en el punto de equilibrio del filtrado es igual al 0,02 N (método AWWA).
ISOTERMA DE ADSORCIÓN	Es la medida de la capacidad de adsorción en función de la concentración de la sustancia adsorbida (adsorbato) a una temperatura preestablecida. Puede representarse como una curva en un diagrama en el que se representa la cantidad adsorbida por unidad de masa del adsorbente y la concentración en el punto de equilibrio del adsorbato.
LECHO FIJO	Proceso de adsorción en el cual el material adsorbente permanece fijo, en el interior de la columna, hasta su saturación completa.
LECHO MÓVIL	Designa una operación a contracorriente dentro de una columna de adsorción individual. El carbón saturado es desplazado hasta el extremo inferior de la columna y el carbón fresco (o regenerado) se añade al extremo superior. El flujo del líquido se mueve de abajo a arriba, en dirección opuesta a la del carbón.
MACROPOROS	Se llaman así a los poros contenidos en el carbón activado cuyo diámetro sea superior a los 500 Ångstrom.
MAKEUP	Carbón activado fresco que hay que añadir al finalizar un ciclo de reactivación para compensar las pérdidas derivadas del proceso regenerativo.

MELAZA (INDICE DE...)	Representa la capacidad de un carbón activado de adsorber sustancias de elevado peso molecular. Puede ser determinado de varios modos, siendo el principio base el cotejo de las densidades ópticas del resto filtrado de una solución estandarizada de melaza, tratada con un carbón activado estándar y con el carbón activado sometido a análisis.
MESH	Es la granulometría de las partículas de carbón activado según la clasificación establecida por la Asociación Americana U.S Sieve series.
MESOPOROS	Poros contenidos en el carbón activado cuyo diámetro queda comprendido entre los 500 y 30 Ångstrom. Microporos, son poros contenidos en el carbón activado cuyo diámetro sea inferior a 30 Ångstrom.
PÉRDIDA DE CARGA	Es la caída de presión que tiene lugar durante el paso de un fluido a través de una columna que contiene carbón activado. Queda determinada por la resistencia dinámica opuesta por las partículas de carbón al paso del fluido. Depende de la granulometría del carbón, viscosidad del fluido y de la velocidad lineal.
QUIMISORCIÓN (O QUIMIADSORCIÓN)	Adsorción en la que las fuerzas de enlace que ligan las moléculas del adsorbato a la superficie del adsorbente son de naturaleza química (valencias) en lugar de físicas (Van der Vaals).
QUÍMICO-FÍSICA (INSTALACIÓN O PLANTA...)	Secuencia de tratamientos en los que se emplean procesos de naturaleza químico-física, con exclusión de procesos biológicos bien definidos. Una planta de este tipo, cuando es posterior a una planta biológica existente, puede definirse como una planta de tratamiento terciario, aún cuando sea de tipo químico-físico en un sentido más general.
REACTIVACIÓN	Restablecimiento de la capacidad de adsorción de un carbón saturado. Puede efectuarse mediante tratamiento térmico, físico o químico.
REACTIVACIÓN (PÉRDIDA DE...)	Se llama de este modo a las pérdidas en la canti-

dad original de carbón durante el proceso de reactivación térmica en horno. Son del orden del 5-10% de masa, y derivan de una combustión parcial o de stress de tipo mecánico.

- TASA O ÍNDICE DE CARGA** Es la capacidad máxima de adsorción de un carbón activado en las condiciones de trabajo y dentro de los límites previstos de rendimiento por el proyecto.
- TIEMPO DE CONTACTO** Tiempo que necesita una corriente para atravesar una columna de carbón, suponiendo que toda la corriente fluya a velocidad idéntica. Es igual al volumen del lecho de carbón en vacío, dividido por el volumen del efluente
- HUMEDAD** Porcentaje de la masa de agua contenido en el carbón activado.
- VELOCIDAD LINEAL** La velocidad con la cual un fluido atraviesa una columna o un sistema vacío, expresada normalmente en metros por minuto.
- VOLUMEN DE LOS POROS** Suma de los macro, meso y microporos, en un carbón activado, o sea su volumen total. Se expresa generalmente en cm^3/g .
- VOLUMEN DE LOS VACÍOS** Es la suma de los volúmenes de todos los intersticios que quedan libres entre las partículas de carbón en una columna. Se expresa como porcentaje del volumen total del lecho.
- ZONA DE TRANSFERENCIA DE MASA** En un lecho de carbón activado es la región en la que la concentración del adsorbato contenido en la fase fluida decrece, respecto a su valor inicial de entrada, hasta la concentración menor analíticamente observable.

7. ABREVIATURAS

ARC	Agua residual cruda
Å	Amstrong
A&G	Aceites y grasas
AMP	Amperios
°C	Grados centígrados
C	Concentración residual del soluto, mg/l
C _b	Concentración de material orgánico al producirse agotamiento, mg/l
C _d	Cadmio
C _E	Concentración de ruptura (equilibrio), mg/l
C _i	Concentración de material orgánico inicial, mg/l
Cl	Cloro
Co	Concentración inicial de soluto, g/l
COV	Compuestos orgánicos volátiles
Cr	Cromo
D	Altura del lecho de carbón activado
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno, mg/l
Do	Profundidad crítica del lecho de carbón activado, cm
DQO	Demanda química de oxígeno, mg/l
ETB	Efluente de tratamiento biológico
ETP	Efluente de tratamiento primario
ETS	Efluente de tratamiento secundario
g	Gramos
gal.	Galones
HP	Potencia de una bomba (horse power)
i	Ordenada en el origen
K	Constante de velocidad de adsorción, cm ³ /mg.min
LAR	Lodo activado recirculado
m	Masa de carbón activado, g
mm	milímetros
n	Constante para cada soluto (Isoterma de Freundlich)
No	Capacidad de adsorción, mg/cm ³
NTU	Unidades nefoletricas de turbiedad
Pb	Plomo
pH	Potencial hidrógeno
Pt-Co	Platino-Cobalto
q	Masa adsorbida de contaminante por unidad de masa de absorbente g/g
Q	Caudal, m ³ /d
RPM	Revoluciones por minuto
S	Pendiente, min/cm
SST	Sólidos suspendidos totales

SDT	Sólidos disueltos totales
T	Tiempo de servicio, d
Tb	Tiempo hasta agotamiento, d
v	Velocidad, cm/min
Vol	Voltaje
X	Cantidad de sustancia adsorbida, g
Xb	Masa de material orgánico adsorbido al agotamiento, g
ZTM	Zona de transferencia de masa

Luis Alberto Bonilla Abarca

Ingeniero Químico, Diplomado en Docencia Superior, Magister en Ingeniería Ambiental Docente Principal de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, carrera de Ingeniería Química, Asignaturas Operaciones Unitarias y Diseño de Plantas. Coordinador de Gestión Curricular carrera de Ingeniería Química, UG. Asesor Ambiental y en plantas de alcoholes

Martha Bermeo Garay Ingeniera Química. Diplomado en Docencia Superior. Magister en Ingeniería Ambiental. Doctorado en Ciencias Ambientales. Docente Principal de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, Asignaturas: Ingeniería de Aguas y Medio Ambiente, Ecología, y Tratamiento de Residuos Sólidos. Asesora técnica en Tratamiento de Aguas y aguas residuales

Stefanie Michelle Bonilla Bermeo, Ingeniero Química, Magister en Procesamiento y Conservación de Alimentos. Docente de la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, carrera de Ingeniería Química, Asignaturas Cinética de Reacciones y Sistemas de Calidad. Coordinadora de Maestría de Alimentos

Ivan Patricio Viteri García, Ingeniero Químico, Magister en gestión ambiental, Magister en Administración de Empresas. Docente de la Universidad de Guayaquil, Especialista en Gerencia de proyectos, Columnista editorialista, Consultor independiente de proyectos

ISBN: 978-9942-760-71-5



9 789942 780715