

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DE UN TRATAMIENTO DE AGUAS POR
CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DEL BAMBÚ DE LA ESPECIE *CHUSQUEA
SCANDENS KUNTH***

NICOLAS VEJARANO LEAL

IVAN DARIO CASAS CONTRERAS

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUIMICO**

Director

DIANA MARCELA CUESTA PARRA

INGENIERA AMBIENTAL

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTA D.C

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre: Diana Marcela Cuesta Parra

Firma del director

Nombre: Ivan Ramírez Marín

Firma jurado 1

Nombre: Claudio Moreno

Firma jurado 2

Bogotá D.C, agosto 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector de Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector administrativo y financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de Facultad de Ingenierías

Dr. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Departamento de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEORICO	16
1.1. Especie de bambú <i>Chusquea Scandens Kunth</i>	16
1.2. Producción y obtención del bambú de la especie <i>Chusquea Scandens Kunth</i> en el medio colombiano	16
1.3. Carbón proveniente del bambú	16
1.4. Métodos de obtención del carbón activado	17
1.4.1. <i>Activación física</i>	18
1.4.2. <i>Activación química</i>	19
1.5. Isotermas de adsorción	20
1.5.1. <i>Equilibrio de adsorción</i>	20
1.5.2. <i>Isoterma de Freundlich</i>	21
1.5.3. <i>Isoterma de Langmuir</i>	21
1.5.4. <i>Diferencia entre adsorción y absorción</i>	22
1.6. Antecedentes de la producción de carbón activado	22
1.7. Tratamiento de aguas	23
1.7.1. <i>Pretratamiento de aguas</i>	23
1.7.2. <i>Tratamiento terciario</i>	24
1.7.3. <i>El carbón activado en el tratamiento de aguas</i>	25
1.7.4. <i>Aguas residuales industriales</i>	26

1.7.5. Selección tipo de tratamiento de aguas	28
1.8. Tipo de pigmentos	28
1.8.1. Pigmento orgánico	28
1.8.2. Pigmento inorgánico	28
1.9. Producción pigmento	29
1.10. Contaminantes en el agua por pigmentos	29
1.11. Composición de los pigmentos	30
2. METODOLOGIA	31
2.1. Fase de experimentación para la caracterización del carbón activado	31
2.1.1. Ensayo de determinación de número de yodo	31
2.1.2. Determinación de densidad aparente	33
2.1.3. Determinación del índice de azul de metileno	34
2.1.4. Medición de isoterms	34
2.1.5. Determinación de la humedad	35
2.1.6. Determinación de Cenizas	35
2.1.7. Determinación del pH del carbón activado	36
2.2. Fase experimental del agua a tratar	37
2.2.1. Diseño de experimentos	37
2.2.2. Tipo de agua	38
2.2.3. Conductividad	38
2.2.4. pH	39
2.2.5. Espectrofotometría	39
2.2.3.a Barrido espectral	39
2.2.6. Sólidos suspendidos totales (SST)	39

2.2.7. <i>Turbidez</i>	40
2.3. Ensayos realizados externamente	40
2.3.1. <i>Demanda química de oxígeno (DQO)</i>	40
2.3.2. <i>Medición de Hidrocarburos</i>	40
2.3.3. <i>Color verdadero</i>	40
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
3.1. Requerimientos técnicos para el desarrollo del tratamiento de aguas	41
3.1.1. <i>Propiedades fisicoquímicas del carbón</i>	41
3.1.2. <i>Adsorción del carbón activado</i>	42
3.1.3. <i>Factores que influyen en la adsorción de contaminantes presentes en el agua</i>	45
3.1.4. <i>Sistema discontinuo o por lotes</i>	49
3.1.5. <i>Selección de variables de diseño</i>	50
3.1.6. <i>Selección agua a tratar</i>	51
3.1.7. <i>Turbidez</i>	51
3.1.8. <i>Color</i>	52
3.1.9. <i>pH</i>	52
3.1.10. <i>Conductividad</i>	52
3.2. Pruebas fisicoquímicas para determinar la capacidad de adsorción del carbón activado	53
3.2.1. <i>Ensayo determinación número de yodo</i>	54
3.2.2. <i>Densidad aparente del carbón activado</i>	56
3.2.3. <i>Determinación del índice de azul de metileno</i>	57
3.2.4. <i>Porcentaje de humedad</i>	58
3.2.5. <i>Contenido de ceniza</i>	59
3.2.6. <i>pH del carbón</i>	60

3.2.7. <i>Isotermas de Adsorción</i>	61
3.3. <i>Análisis de viabilidad en el tratamiento de aguas</i>	64
3.4. <i>Resultado de variables pre y post tratamiento</i>	64
3.4.1. <i>Determinación de pH</i>	65
3.4.2. <i>Conductividad</i>	66
3.4.3. <i>Turbidez</i>	68
3.4.4. <i>Remoción de color</i>	70
3.4.5. <i>Sólidos Suspendidos Totales</i>	72
3.5. <i>Análisis de ensayos externos</i>	73
3.5.1. <i>Color verdadero</i>	73
3.5.2. <i>Remoción de hidrocarburos</i>	73
3.5.3. <i>Demanda Química de Oxígeno</i>	74
3.5.4. <i>Análisis estadístico</i>	74
4. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFIA	82
ANEXOS	89

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. <i>Objetivo de los procesos de un pretratamiento</i>	24
Tabla 2. <i>Descripción de las características para la valoración de la calidad del agua</i>	26
Tabla 3. <i>Concentraciones de color y cantidad de agua generada</i>	29
Tabla 4. <i>Compuestos con mayor probabilidad de ser eliminados por el carbón</i>	46
Tabla 5. <i>Compuestos con alta probabilidad de ser adsorbidos por el carbón activado</i>	47
Tabla 6. <i>Compuestos con probabilidad moderada de ser eliminados por el carbón activo</i>	48
Tabla 7. <i>Compuestos para cuya eliminación no es probable que el carbón activo sea efectivo</i>	48
Tabla 8. <i>Resumen artículos</i>	49
Tabla 9. <i>Resultados medidas de tendencia central</i>	51
Tabla 10. <i>Resumen de resultados</i>	53
Tabla 11. <i>Datos número de yodo</i>	55
Tabla 12. <i>Datos densidad aparente</i>	57
Tabla 13. <i>Índice de azul de metileno</i>	58
Tabla 14. <i>Porcentaje de humedad</i>	59
Tabla 15. <i>Porcentaje de ceniza</i>	60
Tabla 16. <i>pH del carbón activado</i>	61
Tabla 17. <i>Resumen resultados isotermas</i>	63
Tabla 18. <i>Resumen ensayos realizados pre y post tratamiento</i>	64
Tabla 19. <i>Resumen DQO</i>	74
Tabla 20. <i>Matriz del diseño de experimentos</i>	75
Tabla 21. <i>Análisis de varianza</i>	76
Tabla 22. <i>Resumen de hipótesis.</i>	77
Tabla 23. <i>Análisis de varianza</i>	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Reacciones de activación al carbonizado.</i>	19
Figura 2. <i>Proceso de producción de agua de alta calidad mediante el uso de carbón activado</i>	25
Figura 3. <i>Nitrocelulosa</i>	30
Figura 4. <i>Planteamiento diseño de experimentos</i>	38
Figura 5. <i>Principales grupos funcionales del carbón activado</i>	44
Figura 6. <i>Ensayo número de yodo</i>	55
Figura 7. <i>Ensayo densidad aparente</i>	56
Figura 8. <i>Ensayo índice de azul de metileno</i>	58
Figura 9. <i>Ensayo contenido de ceniza</i>	60
Figura 10. <i>Ensayo pH del carbón activado</i>	61
Figura 11. <i>Nitrogen adsorption isotherm</i>	62
Figura 12. <i>pH vs C (135 min)</i>	65
Figura 13. <i>pH vs C (180 min)</i>	66
Figura 14. <i>Ensayo conductividad</i>	67
Figura 15. <i>Conductividad vs Concentración (135 min)</i>	67
Figura 16. <i>Conductividad vs Concentración (180 min)</i>	68
Figura 17. <i>Porcentaje remoción de turbidez vs C (135 min)</i>	69
Figura 18. <i>Porcentaje remoción de turbidez vs C (180 min)</i>	70
Figura 19. <i>Porcentaje remoción de color vs Concentración (135min)</i>	71
Figura 20. <i>Porcentaje remoción de color vs Concentración (180min)</i>	72

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. <i>Capacidad de equilibrio</i>	20
Ecuación 2. <i>Isoterma de Freundlich</i>	21
Ecuación 3. <i>Constantes de Freundlich</i>	21
Ecuación 4. <i>Isoterma de Langmuir</i>	21
Ecuación 5. <i>Constantes de Langmuir</i>	22
Ecuación 6. <i>Cantidad de yodo adsorbido por gramo de carbón</i>	32
Ecuación 7. <i>Normalidad de residuo filtrado</i>	32
Ecuación 8. <i>Número de yodo</i>	32
Ecuación 9. <i>Densidad aparente del carbón activado</i>	33
Ecuación 10. <i>Porcentaje de humedad</i>	35
Ecuación 11. <i>Porcentaje de ceniza</i>	36

GLOSARIO

CARBÓN: Es un material combustible sólido, frágil y poroso con un alto contenido en carbono (del orden del 98 %). Se produce por calentamiento de madera y residuos vegetales, hasta temperaturas que oscilan entre 400 y 700 °C, en ausencia de aire.

CARBÓN ACTIVADO: Es un término genérico que describe una familia de adsorbentes carbonáceos altamente cristalinos y con una porosidad interna altamente desarrollada.

TRATAMIENTO DE AGUAS: Es un proceso con operaciones de distintos tipos (físico, químico, físico-químico o biológico) cuyo objetivo es la eliminación y/o reducción de la contaminación o de las características no deseables de las aguas

POROSIDAD: Es la capacidad de un material de absorber líquidos o gases. También es el tamaño y número de los poros de un filtro o de una membrana semipermeable.

CARGA ORGÁNICA: Se define como el contenido de compuestos de carbono en un efluente, cualquiera sea su origen. Dichos compuestos de carbono son estructuras químicas (moléculas) donde el carbono está enlazado a hidrógeno y otros elementos como azufre, oxígeno, nitrógeno, fósforo y cloro, entre otros.

POLARIDAD: El enlace covalente entre dos átomos puede ser polar o apolar. Esto depende del tipo de átomos que lo conforman: si los átomos son iguales, el enlace será apolar (ya que ningún átomo atrae con más fuerza los electrones). Pero, si los átomos son diferentes, el enlace estará polarizado hacia el átomo más electronegativo, ya que será el que atraiga el par de electrones con más fuerza.

pH: expresa condiciones básicas, ácidas y neutras de una solución. Es medido en escala de 0 a 14, donde 7 expresa que la sustancia es neutra. Los valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica y los valores por debajo de 7 indican que la sustancia es ácida.

RESUMEN

Para un tratamiento terciario del agua se evaluó la viabilidad y efectividad del uso del carbón activado obtenido del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth* a partir de sus propiedades físico-químicas analizando los porcentajes de remoción de contaminantes en el agua.

La propuesta se realizó inicialmente con una amplia búsqueda de los requerimientos técnicos, determinando que contaminantes del agua tendrán mayor afinidad y adhesión física hacia el material orgánico. Al finalizar el diagnóstico de los parámetros se desarrolló la caracterización del carbón activado para evaluar su capacidad adsorptiva utilizando la técnica de azul de metileno, Contenido de humedad, cenizas, índice de yodo, densidad aparente, pH y finalmente las isotermas de adsorción donde se obtuvo un área superficial de 130.8779 m²/g con N₂. Así mismo se caracterizó el agua a tratar con los siguientes análisis: DQO, SST, color, turbidez, conductividad, hidrocarburos y pH, inicialmente se realizó el diseño de experimentos donde los factores considerados fueron la concentración inicial de adsorbente y tiempo de agitación, las variables respuesta fueron los porcentajes de remoción de turbidez y color, obteniendo unos valores para estas de 71.35% y 56.36% respectivamente.

Por último, se desarrolló a nivel laboratorio el tratamiento mediante un test de jarras manteniendo fija la velocidad de agitación en 150 rpm. El tiempo de agitación fue de 135 y 180 minutos, suficiente para alcanzar condiciones de equilibrio obteniendo alternativas con diferentes valores en sus resultados y variables de respuesta. Por medio de un análisis de los resultados experimentales obtenidos en las pruebas de calidad del agua realizadas en el laboratorio de la Fundación universidad de América, se escogió y envió una muestra del agua tratada a un laboratorio externo (Hidrolab) para verificar mediante un análisis postratamiento que los parámetros DQO, Hidrocarburos y color verdadero cumplieran con la norma 0631 del 2015 y estuvieran dentro del rango permitido, de esta manera aprovechar la estructura porosa, área superficial y en general la capacidad de adsorción del carbón activado en un tratamiento para agua residual proveniente de la industria de producción de pigmentos.

PALABRAS CLAVE: Carbón activado, adsorción, descontaminación, *Chusquea Scandens Kunth*, tratamiento de aguas, remoción, parámetros físico-químicos, contaminantes, área superficial, calidad del agua.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los compuestos más abundantes en la naturaleza y representa aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie terrestre. Sin embargo, varios factores limitan la disponibilidad de agua para los humanos [1].

“Más del 80% de las aguas residuales generadas por la sociedad, retornan al ecosistema sin tratamiento previo. La mala gestión de estas aguas residuales, tienen un impacto negativo sobre la salud, nutrición y el medio ambiente” [2].

El tratamiento de aguas mediante el uso de carbón activado se considera un tratamiento terciario en aguas residuales comunes o bien un pre tratamiento en aguas industriales. Actualmente se ve la necesidad de buscar nuevas formas de emplear este proceso, ya sea para aumentar la eficiencia o disminuir los costos del mismo [3].

El carbón activado es utilizado con diferentes finalidades, una de ellas es el tratamiento de aguas el cual se usa para el proceso de adsorción donde los contaminantes son atrapados en la superficie del carbón por su alta porosidad, cantidad de sitios activos disponibles y afinidad polar. El carbón activado tiene diferentes medios de obtención, ya sea mineral o vegetal, la forma vegetal es una sustancia obtenida por la carbonización de materias orgánicas como la cáscara de coco, madera, lignitos y turba, posteriormente se somete a procesos que tienen como finalidad aumentar su grado de porosidad y su área superficial [3].

El proyecto propone evaluar la viabilidad de un tratamiento de aguas con carbón activado vegetal obtenido del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*, utilizando el carbón activado proveniente de la tesis de grado “EVALUACIÓN DE LA OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO UTILIZANDO BAMBÚ DE LA ESPECIE *CHUSQUEA SCANDENS KUNTH* POR ACTIVACIÓN FÍSICA”[4], realizando su debida caracterización para determinar su capacidad de adsorción siguiendo la NTC 4467, y de esta manera mediante un tratamiento terciario remover contaminantes en el agua residual proveniente del molino de chip, derivada del proceso de producción de pigmentos que contiene ciertos contaminantes determinados por las pruebas de calidad del agua, hidrocarburos totales, DQO, turbidez, color verdadero, conductividad, pH y SST.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la viabilidad de un tratamiento de aguas con carbón activado proveniente del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*

Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos técnicos que presenta el proceso de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de carbón activado
- Determinar la capacidad de adsorción del carbón activado del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth* mediante pruebas fisicoquímicas indicadas en la NTC 4467
- Analizar los resultados de remoción de contaminantes obtenidos en el agua finalizado el tratamiento con carbón activado proveniente del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*.

1. MARCO TEORICO.

1.1. Especie de bambú *Chusquea Scandens Kunth*

Debido a las condiciones vegetativas de la planta esta especie cuenta con características particulares, como una alta superficie específica en sus paredes interiores y porosidad, además de esto cuenta con una alta sustentabilidad a nivel comercial a raíz del uso en los países asiáticos para la fabricación de carbones activados o sin activar, destinados a funciones de adsorción. El carbón de bambú con mayor capacidad de adsorción de gases y fluidos, producido en horno metálico es utilizado en empresas mineras, elaboración de filtros, purificación de aguas, industria de alimentos y procesos de producción limpia, el carbón activado de bambú se distingue por su alta disponibilidad y eficiencia al contar con una alta producción de biomasa [5].

1.2. Producción y obtención del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth* en el medio colombiano

La toma de muestra del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth* fue realizada por Cubillos Pita en un cultivo en el municipio de Tabio ubicado en el departamento de Cundinamarca [4].

El municipio cuenta con una temperatura ambiente promedio de 14°C, una altitud de 2.786 msnm y una humedad relativa de 30% [4]. Teniendo en cuenta que el bambú de la especie *Chusquea scandens Kunth* es un bambú leñoso muy abundante en zonas montañosas cercanas a Bogotá [6].

“La parcela donde fue realizada la extracción del material vegetal tiene un área total de 15 hectáreas de las cuales 2,2 hectáreas aproximadamente son de bambú, las cuales fueron cortadas y puede ser viable su utilización como fuente de ingreso al transformarlo en un producto que sea rentable y a la vez que pueda tener demanda en el mercado” [4].

1.3. Carbón proveniente del bambú

El carbón se origina por la descomposición de vegetales terrestres que se acumulan en zonas pantanosas, lagunares o marinas [4]. El carbón es un mineral de origen orgánico compuesto principalmente por carbono. Su formación es el resultado de la condensación gradual de sustancias que descomponen parcialmente las plantas durante millones de años, cuando las plantas se descomponen forman una capa llamada turba [7].

En la agricultura, se sabe que el carbón controla el crecimiento de microorganismos en el suelo y complementa la nutrición orgánica en los cultivos, por otro lado, puede fortalecer la vitalidad del suelo ya que es considerado como un buen modificador del mismo, ya que su capacidad de adsorción permite fijar ciertos elementos tóxicos o patógenos del suelo en su estructura porosa para facilitar su eliminación, además de esto mejora significativamente la calidad de los suelos, saturación de nutrientes, fertilidad, disponibilidad de oxígeno a las raíces de las plantas y finalmente la permeabilidad del suelo reteniendo su humedad [8].

En la industria química, el carbón de bambú se puede utilizar como materia prima para el carbón activado. Gracias a la estructura especial microporosa, el bambú cuenta con una gran capacidad de absorción después de la carbonización. El carbón de bambú también tiene muchos usos medicinales. Las almohadas y el colchón de cama hechos de carbón de bambú tienen efectos para aliviar la tensión en las personas ya que los tejidos de bambú son totalmente biodegradables, muy resistentes y llevan un tratamiento anti ácaros, antihongos y anti bacterias, también se puede usar como desodorante y agente antibacteriano pues son ideales para regular la temperatura [8].

“Los usos del carbón activo de bambú son mucho más amplios: se puede usar como purificador de aire, puede expulsar el gas nocivo durante el proceso de producción de semiconductores, purificar el agua, en la industria alimenticia, en la elaboración de cerveza, la fabricación de azúcar refinada, y en otros campos. Se puede usar como catalizador o soporte de catalizador” [4].

El carbón activado proviene de fuentes naturales como la madera, turba, entre otros. Las materias primas deben poseer un alto porcentaje de carbono en su estructura química, bajo contenido de cenizas posterior al proceso de carbonización [4].

Cabe resaltar que el carbón activado es un gran adsorbente ya que posee una alta área superficial y una estructura porosa que le permite retener partículas. El proceso de adsorción del carbón activado, consiste en la unión de una sustancia gaseosa o líquida en la superficie de una matriz sólida, como consecuencia de fuerzas de Van der Waals [5].

1.4. Métodos de obtención del carbón activado

«El carbón activado no sólo contiene carbono, sino también pequeñas cantidades de oxígeno, nitrógeno, azufre e hidrógeno, que están unidos químicamente en forma de diversos grupos

funcionales, tales como carbonilo, carboxilo, fenol, lactona, quinona, y grupos éter. Estos óxidos superficiales a veces se derivan de la materia prima o se pueden formar durante o después del proceso de activación por la acción del vapor de aire o agua. Todas las materias primas utilizadas para la producción de carbones activados contienen componentes minerales que se concentran durante el proceso de activación. Por otra parte, los productos químicos inorgánicos utilizados en la activación química a menudo se eliminan sólo de forma incompleta. El contenido de ceniza de muchos productos se reduce por el agua o el lavado con ácido. Por lo tanto, los productos comerciales contienen de unas pocas décimas de un porcentaje de hasta un 20% de cenizas. Los principales constituyentes de la ceniza son las sales de los metales alcalinos y alcalinotérreos, en su mayoría carbonatos y fosfatos, junto con óxidos de sílice, hierro y aluminio.» [4]

El carbón activado a nivel comercial es producido a partir de materiales orgánicos ricos en carbono, especialmente carbón mineral, madera, huesos, cáscaras de frutas (coco, nuez y maní), los procesos de obtención se pueden dividir en dos tipos: activación física o térmica y activación química [4].

1.4.1. Activación física

El material carbonizado es tratado con una mezcla de gases de combustión y vapor de agua a altas temperaturas para su activación [9].

Esta forma de activación es la más utilizada; como materia prima emplea el carbón vegetal granulado obtenido previamente en métodos de carbonización a temperaturas entre 400 a 600 °C. El carbón vegetal (materia prima), es sometido a una molienda y clasificado mediante tamices de diferentes tipos de abertura con el propósito de uniformar el tamaño de partículas antes de la activación. El carbón vegetal molido, se coloca dentro de un lecho de activación (con alta resistencia térmica) por donde pasan corrientes de gas a temperaturas entre 800 a 1000 ° C. Como gases de activación generalmente se utiliza el vapor de agua, dióxido de carbono, cloro, gases provenientes de una combustión u otros gases que actúan sobre los materiales volátiles, provocando su arrastre y separación de la estructura del carbón [10].

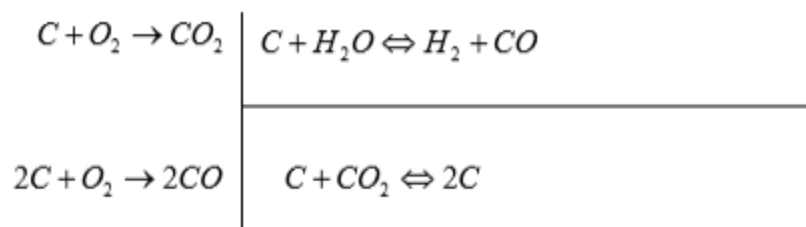
Se recomienda el empleo de gases con oxígeno en su composición para aumentar la reactividad del carbón. Como agente activador se puede utilizar el aire, cuya activación ocurre a 600 ° C, sin embargo, su uso produce reacciones exotérmicas difíciles de controlar. Por lo general, los gases

activadores son gases inertes que permiten obtener carbones activados de buena calidad. Por otro lado, el dióxido de carbono (gas) se aplica a 900 ° C y el vapor de agua alrededor de 1000 ° C [10].

La activación puede ser un proceso totalmente independiente de la carbonización o llevarse a cabo posterior a esta. El cual consiste en hacer reaccionar al agente activante con los átomos de carbono del carbonizado que está siendo activado, de forma que se produce un “quemado selectivo” que va horadado progresivamente al carbonizado, generando poros y aumentando la porosidad hasta transformarlo en un carbón activado. Los agentes activantes dan lugar a las siguientes reacciones químicas donde se eliminan átomos de carbono produciendo así la porosidad [7].

Figura 1.

Reacciones de activacion al carbonizado.



Nota. Reacciones para generación de carbón activado. Tomada de U. SEVILLA, “Manual Del Carbón Activo,” *Aula.Aguapedia.Org*, pp. 1–89, 2011, [Online]. Available: http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/CARBoN ACTIVO DEFINITIVO tar.pdf.

1.4.2. Activación química

Los procedimientos de activación química son realizados por impregnación empleándose sustancias deshidratantes como el cloruro de zinc, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, ácido bórico, ácido nítrico, sulfuro de potasio, sulfatos de magnesio y sodio, etc. La materia prima es transformada en carbón adquiriendo propiedades de adsorción. Es importante resaltar que a diferencia de la activación física en donde tiene que haber una carbonización previa a la activación, el proceso de activación química es aplicado directamente a la materia prima. La carbonización/activación se realiza en una retorta con una temperatura de tratamiento entre 500 a 900°C; a mayor temperatura mayor activación [10].

“Concluido el proceso, se descarga, se enfría y se lava el carbón para recuperar el agente activador, luego el carbón activado se filtra y se seca” [10].

Al igual que el cloruro de zinc, el ácido fosfórico actúa sobre la materia prima, deshidratándola y combinándose con los compuestos oxigenados e hidrogenados, para obtener como subproducto agua. La activación se ve favorecida por esta reacción ya que existirá una menor cantidad de material volátil incorporado en la estructura del carbón. Teniendo en cuenta una temperatura y tiempo de reacción adecuado se mezclara la materia prima con el agente activante [11].

1.5. Isotermas de adsorción

Es la relación general de adsorción de gas a partir de sólidos, en función de la presión del gas a temperatura constante, también se puede definir como la relación de equilibrio entre la cantidad de gas adsorbido y la presión del gas a temperatura constante.

1.5.1. Equilibrio de adsorción

En el equilibrio de adsorción existe una proporción definida de soluto repartida entre las dos fases, líquida y sólida. La forma habitual de expresar esta distribución es la capacidad de equilibrio, definida como:

Ecuación 1.

Capacidad de equilibrio

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} * V$$

Siendo la capacidad de equilibrio, la que hace referencia a la concentración de adsorbato en fase sólida, C_0 es la concentración inicial de absorbible en fase líquida, C_e es la concentración de absorbible en fase líquida en el equilibrio, V es el volumen de disolución y W es la masa de adsorbente. Las isotermas de adsorción son curvas construidas a partir de pares (C_e , q_e) a una temperatura constante. Las fórmulas empleadas frecuentemente para el tratamiento de los datos experimentales de las isotermas de adsorción fueron desarrolladas por Freundlich, por Langmuir, y por Brunauer, Emmet y Teller [12].

1.5.2. Isoterma de Freundlich

De todas las fórmulas empleadas para el tratamiento de datos experimentales de las isotermas, la más usual para describir las características de adsorción del carbón activado empleado en el tratamiento de aguas residuales es la isoterma de Freundlich, la cual está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 2.

Isoterma de Freundlich

$$\frac{X}{M} = Kf C_e^{1/n}$$

Donde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón)

C_e = concentración de equilibrio del adsorbato en solución después de la adsorción.

Kf = constantes empíricas.

Las constantes de la isoterma de Freundlich se determinan representando gráficamente la relación entre (x/m) y C, empleando la ecuación anterior reescrita de la siguiente forma:

Ecuación 3.

Constantes de Freundlich

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log Kf + \frac{1}{n} \log C_e$$

1.5.3. Isoterma de Langmuir

La isoterma de Langmuir se define de la siguiente manera:

Ecuación 4.

Isoterma de Langmuir

$$\frac{X}{M} = \frac{ab C_e}{1 + bC_e}$$

Dónde:

X/m = cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente (carbón)

a, b = constantes empíricas

C_e = concentración de equilibrio de adsorbato en solución después de la adsorción.

La isoterma de adsorción de Langmuir se desarrolló adoptando las siguientes hipótesis:

- Existe un número fijo de puntos accesibles disponibles en la superficie adsorbente, todos los cuales poseen la misma energía
- La adsorción es reversible.

Las constantes de la ecuación de Langmuir se pueden determinar dibujando $C/(x/m)$ frente a C empleando la ecuación anterior expresada de la siguiente forma:

Ecuación 5.

Constantes de Langmuir

$$\frac{C_e}{\frac{x}{m}} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} * C_e$$

1.5.4. Diferencia entre adsorción y absorción

«Cuando una sustancia se adhiere a una superficie se habla de adsorción, fenómeno el cual átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos disueltos son retenidos en una superficie de una sustancia sólida o líquida. En este caso, la sustancia se adhiere a la superficie del carbón activado. Cuando la sustancia es absorbida es un medio diferente entonces se conoce como absorción, por otro lado, cuando un gas es atraído dentro de una solución se habla de absorción, fenómeno en el que los átomos, iones o moléculas de gases, líquidos o sólidos se disuelven en otra sustancia.» [13]

1.6. Antecedentes de la producción de carbón activado

A nivel mundial las investigaciones en torno al aprovechamiento del bambú se encuentran lideradas por países asiáticos, especialmente en la República Popular de China, donde utilizan el bambú para conformar avances técnicos, tecnológicos y de esta manera innovar en este campo. En

cambio en Latinoamérica se ha incurrido muy poco en la utilización del bambú en procesos de investigación [4].

“La especie *Chusquea Scandens Kunth*, es una especie poco reconocida tanto en el mercado Nacional como en el desarrollo de investigaciones principalmente de carbón activado, esta especie ha desarrollado en Colombia avances significativos entorno a la construcción de viviendas por sus propiedades mecánicas” [4].

1.7. Tratamiento de aguas

Actualmente el tratamiento de aguas residuales es realizado por medio de procedimientos fisicoquímicos y biológicos mediante los cuales se busca eliminar parcial o totalmente los contaminantes del efluente para cumplir con la normatividad establecida por cada país.

1.7.1. Pretratamiento de aguas

Mediante el pretratamiento del agua se busca eliminar todo tipo de impurezas en suspensión, sólidos y microorganismos presentes, este procedimiento asegura que la calidad del agua no se vea influenciada por factores externos como las condiciones climáticas o la contaminación.

En una estación depuradora de aguas dónde se remueven constituyentes del agua residual que causen problemas de operación o de mantenimiento, consta de ciertas etapas como:

Tamizado: “En este proceso se emplean equipos para retener sólidos gruesos presentes en el agua residual, estos equipos constan de barras o varillas paralelas” [14].

Flotación: Proceso para separar sólidos de baja densidad [14].

Homogenización de efluentes: Con el mezclado de los distintos efluentes generados en el proceso productivo, se consigue disminuir las fluctuaciones de caudal y concentraciones características de los diferentes vertimientos obteniendo una única corriente con un caudal y concentración más estable en el tiempo. Este proceso mejora la tratabilidad del agua residual, estabiliza el pH, reduce los requerimientos de área y las cargas para un tratamiento posterior, se hace más fácil la dosificación de los reactivos y mejora la confiabilidad y rendimiento del proceso [14].

El pretratamiento es el acondicionamiento inicial realizado a las aguas con el fin de facilitar y preparar las instalaciones, los tratamientos y futuros procesos [15].

Esta etapa del proceso incluye equipos tales como rejas y tamices (para la separación de partículas de gran tamaño, como botellas de plástico), desarenadores y desengrasadores [16].

Finalizado el pretratamiento, en una estación depuradora continua el proceso con un tratamiento primario en decantadores, donde bajo el principio de gravedad las partículas en suspensión se sedimentan [15].

Tabla 1.
Objetivo de los procesos de un pretratamiento

PROCESO	OBJETIVO
Rejas o tamices	Eliminación de solidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de solidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Preaeración	Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico

Nota. Equipos que permiten el desarrollo de un pretratamiento. Tomado de García, O. N. “Lodos residuales: estabilización y manejo.”, (2006).

1.7.2. Tratamiento terciario

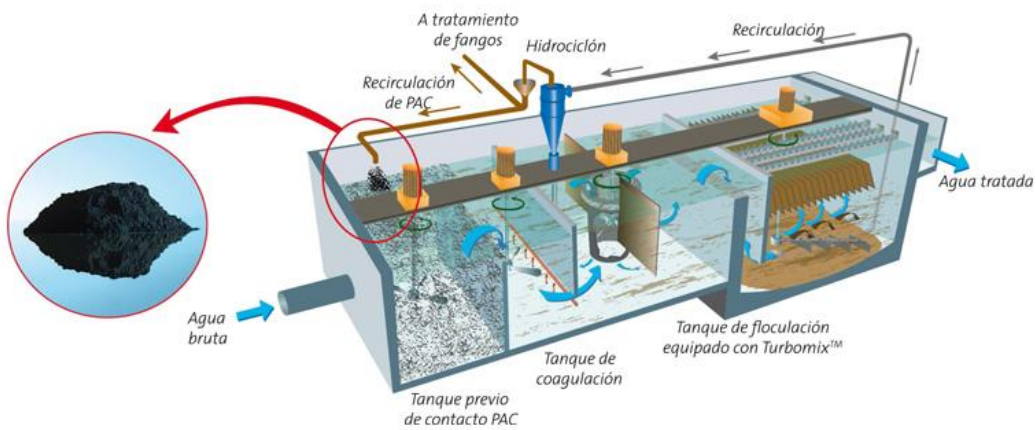
En esta etapa se busca depurar el agua con el fin de conseguir mayores niveles de pureza a los que se pueden alcanzar mediante métodos tradicionales biológicos y fisicoquímicos. Esto sucede en ciertos casos específicos donde: Un contaminante como un color o un olor no cumple con los requerimientos del usuario. Cuando el fin no es únicamente cumplir con la norma del agua residual, sino también utilizar el agua para servicios, riego u otra utilidad donde el nivel de pureza necesario sea mayor al obtenido con los tratamientos primarios y secundarios [17].

Un caso en específico puede ser cuando al finalizar los tratamientos primario y secundario los niveles contenidos de DQO en el agua oscilan entre 30 y 100 mg/l, el carbón activado puede ser utilizado para así disminuir los valores [17].

Otro ejemplo: finalizado los tratamientos los niveles de DQO son aceptables, pero aun así se presenta un olor o un color de origen orgánico, el carbón activado puede removerlo [17].

Figura 2.

Proceso de producción de agua de alta calidad mediante el uso de carbón activado



Nota. Equipo de tratamiento con agitación, coagulación y floculación integrada.
Tomada de “Veolia Water Technologies”.

1.7.3. El carbón activado en el tratamiento de aguas

El uso del carbón activado en un tratamiento de aguas es necesario cuando el agua contiene uno o más contaminantes que impiden o dificultan el tratamiento secundario también conocido como biológico. Entre estos contaminantes podemos encontrar moléculas tóxicas para los microorganismos, como lo son: Tolueno, fenol, benceno, cloruros, nitritos y plaguicidas. De igual manera pueden ser moléculas conocidas como “refractarias” ya que representan una gran dificultad de digestión o degradación para los microorganismos. Para lograr su eliminación es necesario escoger un carbón activado con una gran cantidad de macro poros en su área superficial

y de igual manera que no existan otras moléculas con tamaño similar compitiendo por los sitios activos disponibles. De lo contrario, a través del tiempo el carbón llegaría a un punto de saturación de compuestos orgánicos finalizando su proceso de adsorción. El uso de este carbón en la etapa de pretratamiento generalmente se realiza en lechos fijos, como CAG (carbón activado granular). Sin embargo también puede realizarse como CAP (carbón activado en polvo) [17].

Las partículas del carbón activado tienen una microestructura porosa con una superficie muy grande, donde los contaminantes en el tratamiento de aguas son retenidos por medio de adhesión física. La eficacia de la adsorción está ligada directamente al tamaño de los poros, las moléculas, el área superficial, la concentración de partículas, el tiempo de contacto y la temperatura [3].

1.7.4. Aguas residuales industriales

Proceden de cualquier actividad industrial en cuyo proceso de producción han sufrido cierta transformación o manipulación donde pierde la calidad debido a la existencia de diferentes contaminantes. Dichas aguas deben cumplir con unos parámetros mínimos para el vertimiento en sitios puntuales como puede ser el alcantarillado o fuentes naturales.

La calidad de diferentes tipos de aguas se ha valorado a partir de las variables físicas, químicas y biológicas [18].

Tabla 2.

Descripción de las características para la valoración de la calidad del agua

CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
FÍSICAS	<p>Temperatura: Un parámetro condicional debido a que su variación ocasiona cambios en la densidad, viscosidad y de igual manera afecta la velocidad de sedimentación, la transferencia de oxígeno en posibles tratamientos biológicos.</p> <p>Sólidos: El contenido de sólidos en aguas residuales que se oxidan consumiendo el oxígeno disuelto, por lo cual deben ser retirados. Sean sólidos totales, disueltos, suspendidos, entre otros.</p>

Tabla 2. *Continuación*

QUÍMICAS	<p>Las aguas industriales reciben material orgánico e inorgánico dentro de los procesos de producción. Este tipo de contaminantes depende de cada industria y las sustancias de trabajo.</p> <p>Por ejemplo:</p> <p>SALES: Se encuentran en solución</p> <p>NUTRIENTES: Principalmente proteínas con agregado de nitrógeno y compuestos orgánicos, estos promueven el crecimiento de organismos en el agua.</p> <p>TÓXICOS: Sustancias de gran afectación hacia las aguas y perjudiciales para la salud de las personas, plantas y animales.</p> <p>COMPUESTOS ORGÁNICOS: Constituidos por proteínas, grasas, carbohidratos, entre otros. Estos compuestos no necesitan un análisis muy detallado debido a la gran variedad de sustancias contenidas en el agua.</p>
BIOLÓGICAS	<p>El agua residual puede tener características apropiadas para la reproducción de microorganismos, alguno de ellos puede ser patógeno y causar algún daño a la salud de humanos y animales; otros pueden degradar la materia orgánica en presencia o ausencia del oxígeno disuelto en agua.</p>

Nota. Variables por las cuales se valora la calidad del agua. Tomado de Margarita Maria Forigua Medina, “Desarrollo de una propuesta de mejoramiento para el tratamiento de aguas residuales de la planta de nitrato de amonio en fertilizantes colombianos ferticol s.a.” <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/491/1/6101427-2016-2-iq.pdf> (accessed may 20, 2021).

Según la Resolución No. 0631 del 17 de marzo del 2015, establecida por el Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible. En la cual se tiene en cuenta el **CAPÍTULO VI. PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y SUS VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (ARND) A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES.** Artículo 13: “parámetros fisicoquímicos a monitorear y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales No Domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales de actividades asociadas con fabricación y manufactura de bienes”. Dentro de la cual se especifican los parámetros necesarios

de vertimientos de agua residuales no domésticas, teniendo en cuenta la producción, fabricación y manejo de sustancias químicas y fertilizantes o productos agroquímicos [19].

1.7.5. Selección tipo de tratamiento de aguas

Para este proyecto se escogió hacer un tratamiento de aguas de tipo terciario con el fin de depurar el agua. Esta agua contiene contaminantes específicos, pigmentos orgánicos con base de nitrocelulosa y algunas trazas de grasas siendo esta la razón principal.

1.8. Tipo de pigmentos

En la industria se utilizan dos tipos de pigmentos el pigmento orgánico e inorgánico.

1.8.1. Pigmento orgánico

La mayoría de las sustancias orgánicas no tiene un color visible, la absorción tiene lugar en el espectro ultra violeta como por ejemplo el éter del petróleo, la acetona, el cloroformo, el tolueno, el fenol, la naftalina y demás sustancias [20].

“En la mayoría de los casos, los pigmentos orgánicos tienen un poder de cobertura menor que los inorgánicos, pero presentan una mayor fuerza de color y brillo. Se basan principalmente en carbono, hidrógeno y nitrógeno, y se pueden clasificar en tres grupos principales: pigmentos azoicos, pigmentos policíclicos y pigmentos antraquinónicos” [21].

1.8.2. Pigmento inorgánico

Los pigmentos inorgánicos se basan casi en su totalidad en óxidos, hidróxidos de óxido, azufre, silicatos, sulfatos o carbonatos, y se pueden dividir en cuatro categorías: pigmentos blancos, pigmentos negros (negro de carbón), pigmentos de color y pigmentos especiales [22].

Los compuestos inorgánicos también son conocidos como pigmentos minerales o pigmentos sintéticos puesto que algunos se encuentran en la naturaleza o son hechos por el hombre. Sus características están ligadas meramente a su obtención por lo que no poseen características generales [20].

1.9. Producción pigmento

En nuestro caso de estudio el agua a tratar contiene un pigmento orgánico de nitrocelulosa elaborado por molienda del mismo, este pigmento fue elaborado por una industria productora de pinturas automotrices siguiendo la NTC 1802 [33].

1.10. Contaminantes en el agua por pigmentos

Más de 10.000 tipos diferentes de pigmentos y tintes sintéticos se utilizan en diferentes industrias, como la textil, la fabricación de papel, la cosmética y la farmacéutica. Muchas actividades industriales descargan grandes cantidades de aguas residuales contaminadas con colorantes al medio ambiente [23].

Tabla 3.

Concentraciones de color y cantidad de agua generada

INDUSTRIA	CANTIDAD DE AGUA GENERADA (m ³ /Ton)	CONCENTRACIÓN DE COLOR (Unidades Hazen)
Azucarera	0.4 m ³ /Ton caña triturada	150-200
Cervezería	0.25 m ³ /Ton cerveza producida	200-300
Destilería	12 m ³ /Ton de alcohol producido	200-300
Curtido	28 m ³ /Ton de piel	400-500
Pulps y papel	175 m ³ /Ton de papel	100-600
Textil	120 m ³ /Ton de fibra	1100-1300

Nota. Concentraciones de color y cantidad de agua generada. Tomada de Y. Anjaneyulu, N. Sreedhara Chary, and D. Samuel Suman Raj, “Decolourization of industrial effluents - Available methods and emerging technologies - A review,” *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 4, no. 4, pp. 245–273, 2005, doi: 10.1007/s11157-005-1246-z.

Las mayores fluctuaciones en parámetros para determinar la pureza del agua se ven reflejados en pH, DQO, DBO, color y salinidad.

La composición del agua residual de la industria de pinturas dependerá de las sustancias químicas que se usen durante el proceso [23], de igual forma pueden depender del tipo de pigmento utilizado ya sea orgánico o inorgánico, puesto que puede contener metales pesados y/o sustancias peligrosas para la salud humana.

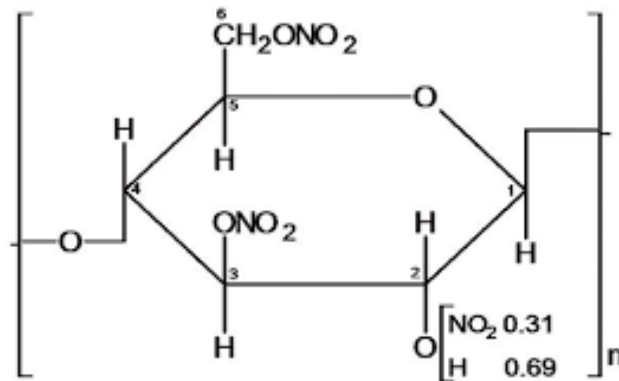
Según la ONU la industria de pigmentos y colorantes produce el 20% de aguas residuales y genera un 10% de emisiones de carbono, siendo este un problema para la mayoría de centros de tratamientos de aguas [24].

1.11. Composición de los pigmentos

La composición de los pigmentos depende del origen y la naturaleza de este, debido a que puede ser un pigmento orgánico o inorgánico, los pigmentos orgánicos se caracterizan por tener una estructura y características definidas, los inorgánicos dependen del metal del cual están compuestos en su mayoría, este definirá sus características y su estructura.

Teniendo en cuenta la información del proveedor del agua a tratar el pigmento de este caso es un pigmento azul de nitrocelulosa.

Figura 3.
Nitrocelulosa



Nota. Estructura molecular de la nitrocelulosa. Tomada de Rubén Rasines Ladero, María López López, Mercedes Torre Roldán, Carmen García Ruiz. “Nitrocelulosa en explosivos: propiedades y caracterización química.”, 2009.

2. METODOLOGIA

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se desarrolló la metodología teórico-experimental, la primera fase comprende el análisis de los requerimientos técnicos necesarios para la remoción de contaminantes en un proceso de adsorción con carbón activado. Se acudió a fuentes bibliográficas en revistas indexadas y proyectos de grado universitarios tanto de pregrado como de maestría que sirvieron de sustento científico para el uso del carbón activado en el tratamiento de aguas. En la fase experimental se caracterizó el carbón activado, según la NTC 4467 que incluye: índice de yodo, densidad aparente, azul de metileno, pH, humedad, cenizas y la determinación de isotermas de adsorción; posteriormente se efectuó el tratamiento de aguas, donde se realizaron los siguientes análisis: DQO, SST, color, turbidez, conductividad, hidrocarburos y pH.

2.1. Fase de experimentación para la caracterización del carbón activado

Los métodos de ensayo de adsorción se indican en la norma técnica colombiana (NTC) 4467: “PRODUCTOS QUÍMICOS INDUSTRIALES: CARBÓN ACTIVADO. MÉTODOS DE ENSAYO”, en donde se seleccionaron los ensayos más comunes para poder ser comparados con otros carbones activados.

2.1.1. *Ensayo de determinación de número de yodo*

Para la determinación del número de yodo se utiliza la norma internacional ASTM D4607 “*Determination of iodine number of activated carbon*”, donde se establece que el número de yodo es la capacidad que tiene 1 gramo de carbón activado para adsorber una cantidad en mililitros de yodo, además de esto este ensayo puede determinar el área superficial que presenta el carbón activado, ya que el yodo es adsorbido en una monocapa que contiene microporos con un valor en (m^2/g) el cual es semejante al área superficial. Si el carbón activado es rico en microporos tendrá una mayor retención de moléculas y área superficial, mientras que los meso y macroporos retienen partículas de mayor tamaño como colorantes o hidrocarburos [25].

Como lo indica la norma inicialmente se colocó el carbón activado molido con la solución estandarizada de yodo, posterior a esto se filtró la solución resultante y se tomó una alícuota para luego ser titulada con una solución estandarizada de tiosulfato de sodio. Finalmente se obtiene el volumen de titulante utilizado para calcular la cantidad de yodo adsorbido por la muestra de carbón

activado, para el cálculo del número de yodo se utilizan las siguientes ecuaciones indicadas en la norma.

Ecuación 6.

Cantidad de yodo adsorbido por gramo de carbón

$$\frac{X}{M} = \frac{A - (2.4 * B * mL \text{ usados de la sln de tiosulfato de sodio})}{g \text{ de carbón empleados}}$$

Donde:

$\frac{X}{M}$ = mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón

A = Normalidad de solución de yodo \times 6436.5

B = Normalidad de solución de tiosulfato de sodio \times 126.93

2.4 = Factor de la alícuota cuando se emplea HCl Para luego proceder a la siguiente ecuación en donde se determina la normalidad del residuo filtrado:

Ecuación 7.

Normalidad de residuo filtrado

$$C = \frac{\text{Normalidad de sln de tiosulfato} * mL \text{ de sln de tiosulfato}}{25 \text{ mL}}$$

Donde: C = Normalidad de residuo filtrado

Por último, se encontró el número de yodo con la ecuación descrita a continuación:

Ecuación 8.

Número de yodo

$$NI = \left(\frac{X}{M}\right) * D$$

Donde:

NI= número de yodo

$\frac{x}{m}$ = mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón

D= normalidad de residuo filtrado © corregido. Tabla en ANEXO 1

Se pesó 0.65g de muestra de carbón activado, en donde entro en contacto con la solución de yodo 0.1N.

Luego es necesario determinar la cantidad de yodo adsorbido por el carbón activado con el propósito de determinar el volumen necesario de titulante para que exista una decoloración de la solución de yodo.

Al decolorarse la solución, la titulación termina y de inmediato se detiene el goteo de titulante para así determinar el volumen utilizado y realizar los respectivos cálculos para hallar el número de yodo.

2.1.2. Determinación de densidad aparente

La densidad aparente es la relación de masa de carbón por unidad de volumen, es decir el volumen que tiende ocupar un peso determinado de carbón, lo que indica que a mayor densidad aparente mayor capacidad de eliminación tendrá para un adsorbato por unidad de volumen de adsorbente, siendo esta una propiedad intrínseca de los carbones es muy importante para determinar la eficiencia del mismo, ya que a menor volumen ocupe un carbón por masa específica existe mayor adsorción con respecto a otros carbones que presenten una densidad superior [4].

Para el desarrollo de este ensayo se pesaron 10 g de muestra de carbón activado que fueron transferidos a una probeta de 100 mL, en la cual se apisono el contenido para conseguir la menor cantidad de espacios vacíos y de esta manera determinar un valor más exacto de la densidad aparente el cual se indica en (g/cm^3). Finalmente se observó el volumen indicado en la probeta para así determinar el volumen de la muestra en base seca [26]. La densidad aparente se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 9.

Densidad aparente del carbón activado

$$\rho_a = \frac{(g \text{ de muestra}) * (100 - \%Hca)}{V \text{ de la muestra} * 100}$$

Donde:

ρ_a = Densidad aparente

%HCA = Porcentaje de humedad del carbón activado

Volumen de muestra expresado en m³

%HCA = Porcentaje de humedad del carbón activado

2.1.3. Determinación del índice de azul de metileno

El índice de azul de metileno está ligado a la cantidad de macro y mesoporos que contenga el carbón activado, ya que al ser un ensayo de decoloración indica la capacidad de un sólido poroso para adsorber este colorante.

Como lo indica la norma NTC 4467, se realizó la solución de azul de metileno con una concentración de 1200 mg/L, se pesaron 0.1 g de carbón activado los cuales fueron mezclados en un vaso de precipitado con 25 mL de solución de azul de metileno, la muestra se agito muy bien hasta obtener una decoloración, luego de notar la ausencia del color azul en la mezcla se adicionaron 5 mL de la solución de azul de metileno, nuevamente se agito con el fin de obtener la decoloración y de esta manera en repetidas ocasiones determinar el volumen necesario para que se detuviera la decoloración [26].

El índice de azul de metileno se determina por los mililitros consumidos por la solución de azul decolorada [26].

2.1.4. Medición de isotermas

Este método es un procedimiento general para evaluar un carbón activado por la técnica de isoterma de adsorción. Se suministra una base común para desarrollar un procedimiento de evaluación del carbón en aplicaciones en fase líquida.

“La isoterma de adsorción de N₂ está basada en el estudio de las cantidades de gas que son adsorbidas por un sólido, en función de la presión relativa del gas en contacto, a temperatura constante” [27].

Para la isoterma de adsorción la curva característica se fundamenta en la cantidad de volumen de gas adsorbido por el sólido, la cual se puede determinar por la aplicación de distintos métodos con el fin de obtener la caracterización de la estructura porosa y superficial de los distintos materiales en un análisis a la temperatura normal de saturación (77K) del Nitrógeno gaseoso [27].

2.1.5. Determinación de la humedad

La humedad se define como la cantidad de agua, vapor o cualquier otro líquido dentro de un cuerpo o adherido a su superficie [28].

Según la NTC 4467. En un recipiente previamente tarado, se pesaron 2 gr de la muestra con precisión. Luego se secaron en una estufa a 110°C durante 2h; a continuación, se dejó enfriar en un desecador y se pesó rápidamente.

La humedad se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 10.

Porcentaje de humedad

$$\%Hca = \frac{\text{Pérdida de peso}}{\text{Peso de la muestra}} * 100$$

2.1.6. Determinación de Cenizas

Es producto de la combustión de sustancias inorgánicas contenidas en algún material, como sales minerales. Donde una fracción permanece en forma de polvo en el lugar de quemado y una fracción puede ser expulsada al aire como parte del humo [29].

Se secó una muestra de carbón activado hasta peso constante a 150°C (generalmente son suficientes 3h). En seguida se introdujo el crisol en la mufla a 650°C +/- 25°C durante 1h. A continuación, el crisol se colocó en el desecador, se enfrió a temperatura ambiente y se pesó con aproximación a 0.1 mg. Luego, se colocó aproximadamente 1 g de carbón activado seco en un crisol y se pesó con aproximación de 0.1 mg. La cantidad de muestra empleada debe ser tal que el peso de ceniza estimado sea 0.1g. Posteriormente se llevó el crisol a la mufla a 650°C +/- 25°C. La calcinación toma de 3h a 16h dependiendo del tipo de carbón activado y del tamaño de partícula. Se considera que la calcinación es completa cuando se alcanza el peso constante [26].

Se colocó el crisol en el desecador y se dejó enfriar a temperatura ambiente, cuando se enfrió se permitió la entrada de aire lentamente para evitar la pérdida de ceniza. Luego se pesó con aproximación a 0.1 mg [26].

La ceniza se calcula como porcentaje mediante la siguiente ecuación.

Ecuación 11.

Porcentaje de ceniza

$$Ac = \frac{F - G}{B - G} * 100$$

Donde:

Ac = Cantidad de ceniza expresada.

G = masa del crisol, en g.

B = masa del crisol con la muestra seca, en g.

F = masa del crisol con las cenizas, en g.

2.1.7. Determinación del pH del carbón activado

La técnica se basa en la medida de la diferencia de potencial originada por la disolución en agua destilada de sustancias presentes en el carbón activado y permite conocer el pH de cualquier carbón activado, en polvo o granular.

Se midieron 100 ml de agua destilada en un matraz y se transfirieron a un vaso de precipitado de 250 ml. Luego de esto se pesaron 2.22 gr de carbón activado con precisión de 0.1 mg. A continuación, se adiciono el carbón pesado al vaso de precipitado que contiene los 100 ml de agua destilada y se agito suavemente para asegurar que todo el carbón se encuentre en contacto con el agua. Posterior a esto se hirvió la suspensión durante 2 min, esto se filtró por gravedad en papel de poro medio. Con los primeros 20 ml del filtrado se enjuagan las paredes del vaso de precipitados y se descarta. El filtrado restante se recolecta. Para finalizar el proceso se enfrió la solución a temperatura ambiente [26].

A continuación, se verifico la calibración del medidor de pH, enjuagando el electrodo con agua destilada y finalmente se registró el pH de la solución.

2.2. Fase experimental del agua a tratar

De la misma manera en la que se desarrolló una caracterización del carbón activado se realizó una para el agua a tratar, para así conocer sus características físico-químicas en general y su cantidad de contaminantes.

2.2.1. *Diseño de experimentos*

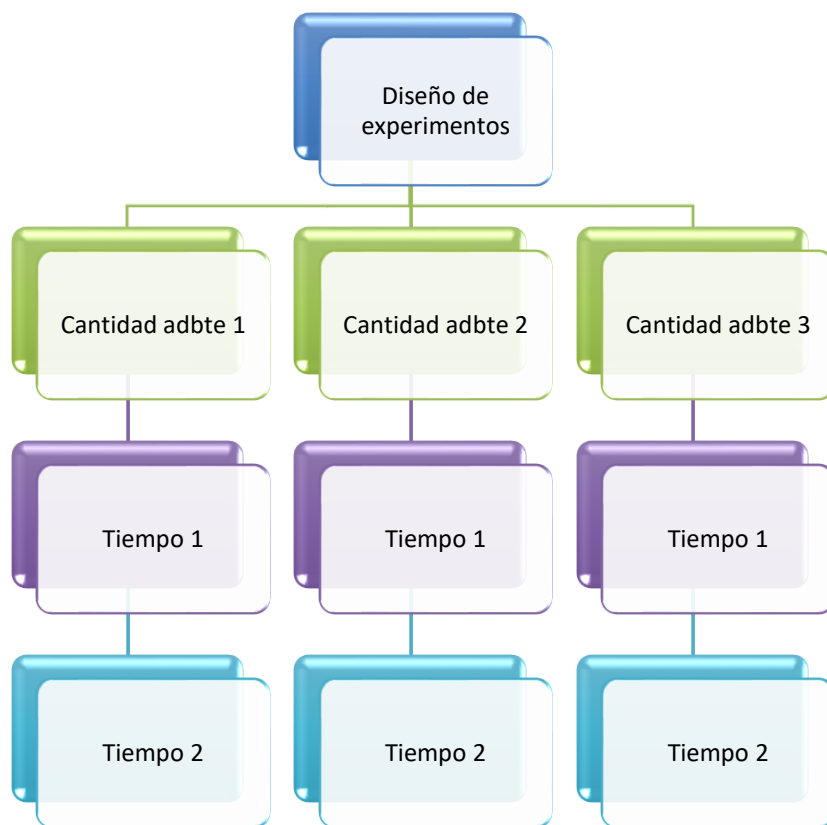
Para determinar el método de experimentación se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados se presentan en las tablas 14 y 16. El ANOVA consiste en la clasificación de los resultados estadísticos (comparación entre la variación del tratamiento, cambio en la combinación de niveles variables y la variación debida a errores aleatorios inherentes a las mediciones generadas) [30].

La prueba F de Fisher, definida como la relación del efecto medio cuadrado y el error medio cuadrado, se utilizó para evaluar la existencia de diferencias significativas entre la respuesta de control y para calcular los errores estándar. Cuanto mayor sea el valor de F, más significativo será el coeficiente respectivo. Los valores F (P) fueron usados para identificar los parámetros que tienen influencia significativamente estadística sobre la variable de respuesta[30]. Finalmente establecer bajo un modelo de 2 factores x 3 niveles siendo las variables dependientes los porcentajes de remoción de color y turbidez y las independientes la concentración, el tiempo y la velocidad de agitación, la importancia de cada una de las variables y la de su interacción [31].

La selección del agua a tratar, las condiciones y las variables experimentales se realizaron mediante revisión bibliográfica de 8 documentos de tratamiento de aguas con bioadsorbentes.

Figura 4.

Planteamiento diseño de experimentos



Nota. Modelo de experimentos aplicado con dos factores y tres niveles.

2.2.2. Tipo de agua

Para efectuar el tratamiento de aguas se realizó una búsqueda bibliográfica de la afinidad del carbón activado hacia los colorantes, ya que el agua a tratar es resultante del proceso de producción de pigmentos con base en nitrocelulosa, el agua utilizada para este proyecto está contaminada con resinas alquídicas, pigmentos orgánicos, solventes, extendedores inertes, nitrocelulosa y aditivos.

2.2.3. Conductividad

La conductividad establece la capacidad de conducir una corriente eléctrica a través de iones disueltos como sodio (Na^+), calcio (Ca^{+2}), potasio (K^+) y magnesio (Mg^{+2}) en el agua [32].

Se realizó esta prueba con la utilización de un conductímetro Oakton® portátil impermeable tdstestr 1 comparando el agua a tratar y agua natural.

2.2.4. pH

Se tomo el pH en el equipo correspondiente calibrado con agua natural, siendo este un procedimiento de los más significativos y usados en la química del agua. Los tratamientos que se le asignan al agua residual dependen drásticamente del pH que presente el agua a tratar [33].

“El pH metro realiza la medida del pH por un método potenciométrico. Este método se basa en el hecho de que entre dos disoluciones con distinta $[H^+]$ se establece una diferencia de potencial. Esta diferencia de potencial determina que cuando las dos disoluciones se ponen en contacto se produzca un flujo de H^+ , o en otras palabras, una corriente eléctrica” [34].

El pH metro que se utilizó para la toma de resultados es de la marca SI Analytics ®.

2.2.5. Espectrofotometría

La espectrofotometría es una técnica analítica utilizada para medir cuánta luz absorbe una sustancia química, midiendo la intensidad de la luz cuando un haz luminoso pasa a través de la solución muestra, siendo agua natural la solución de muestra, obteniendo resultados de la absorbancia y la transmitancia del agua a tratar.

2.2.3.a Barrido espectral: Es la variación de la longitud de onda, necesario para la búsqueda de un max donde el analito absorbe más luz.

Teniendo en cuenta los conocimientos previos que se tenían se manipulo el espectrofotómetro, empleando agua pura como el blanco, se analizó el agua contaminada para así determinar los valores donde estaba el pico de absorbancia y en esta longitud de onda analizar el agua ya tratada.

El espectrofotómetro que se utilizó en este proyecto fue el Genesys 30® donde se obtuvo la gráfica de absorbancia vs longitud de onda, además de esto permite el movimiento de la gráfica para obtener el dato más alto de absorbancia.

2.2.6. Sólidos suspendidos totales (SST)

Los sólidos suspendidos se determinan como la cantidad de material retenido después de realizar la filtración de un determinado volumen de muestra. El volumen que se filtra es casi mínimo (50 ml), por las dificultades de la filtración. Se peso el papel filtro antes del procedimiento y post tratamiento para determinar los sólidos capturados por el papel.

Se realizó siguiendo los pasos indicados en el manual de caracterización de aguas residuales industriales realizado por el banco interamericano de desarrollo en colaboración de ANDI, se filtró una muestra de agua con papel filtro de peso conocido y se dejó secando en un desecador durante 24 horas para realizar el cálculo [33].

2.2.7. Turbidez

Para la medición de la turbidez se utilizó el método de nefelometría, el cual se basa en el uso de un turbidímetro comercial, con un rango de lectura de 0 NTU a 10.000 NTU, se utiliza una celda previamente limpiada para que no contenga material que pueda afectar la toma de la lectura, la cual tiene un principio de detección de luz dispersa localizada a 90° del haz incidente [35]. El equipo fue calibrado como se indica en las instrucciones del mismo, posteriormente se tomó la muestra pre tratamiento y post tratamiento para calcular el índice de remoción en esta.

2.3. Ensayos realizados externamente

Los siguientes ensayos se realizaron en el laboratorio Hidrolab, cada ensayo se realizó siguiendo un método estándar de referencia.

2.3.1. Demanda química de oxígeno (DQO)

Cantidad de oxígeno requerido, bajo condiciones específicas, para la oxidación de la materia orgánica e inorgánica sobrellevada por el agua.

Este ensayo se realizó siguiendo el SM 5220 D para el agua cruda y tratada.

2.3.2. Medición de Hidrocarburos

El método trabajado es el 5520 C y F. APHA-AWWA-WEF (2012), contenido en el *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22th Edition* (APHA-AWWA-WEF, 2012). Este método es apropiado y aplicable a todo tipo de aguas.

2.3.3. Color verdadero

El método de trabajado es el SM 2120 C para el agua cruda y tratada.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de lo planteado en los objetivos, este capítulo se dividió en tres etapas, la primera etapa corresponde a los requerimientos técnicos para el desarrollo de un tratamiento de aguas con carbón activado como adsorbente, la segunda etapa hace referencia a los resultados de la evaluación de la capacidad de adsorción del carbón activado obtenidos utilizando la técnica descrita en la NTC 4467 y por último una tercera etapa donde se analizan los resultados de remoción de contaminantes en el tratamiento de aguas utilizando un diseño de experimentos de 2 factores y 3 niveles.

3.1. Requerimientos técnicos para el desarrollo del tratamiento de aguas

Para esta etapa se realizó una revisión bibliográfica con las plataformas Scimedirect y Scopus, donde se recolectó la información pertinente para realizar este tratamiento, determinando los requerimientos técnicos necesarios para desarrollar el tratamiento de aguas y de esta manera aprovechar los siguientes parámetros pertinentes.

3.1.1. *Propiedades fisicoquímicas del carbón*

El carbón activado cuenta con una estructura porosa y un área de superficie interna muy elevada, generalmente la estructura química del carbón es una forma bruta de grafito amorfa y aleatoriamente porosa, cuenta con cavidades de distintas dimensiones en sus poros [36].

Las dimensiones y la superficie específica del carbón activado están ligadas a las condiciones de los procesos de activación y carbonización utilizados. Sus dimensiones en los poros varían desde los más pequeños llamados microporos (0-2 nm), hasta los mesoporos (2-50 nm) y macroporos (mayores a 50 nm) [37]. En el caso del carbón activado de la especie *Chusquea Scandens Kunth* casi el 70% del área superficial es ocupada por microporos.

La adsorción en carbón activado se ve afectada por propiedades del carbón y del adsorbato, las propiedades que afectan la adsorción son las siguientes:

- La adsorción aumenta cuando el diámetro de los poros predominantes está entre una y cinco veces el diámetro del adsorbato
- Diferencias en la química superficial y en los constituyentes de las cenizas pueden afectar la adsorción, especialmente en fase líquida

En América latina la investigación e innovación del uso de esta bambú ha sido casi nula, sin embargo en la Universidad de Chile en el año 2007 bajo un estudio se demostró que el carbón activado cuenta con átomos de carbono y grupos funcionales principalmente de nitrógeno y oxígeno en su estructura, dichos grupos funcionales se generan en el proceso de activación por interacción de los radicales libres en la superficie del carbón con átomos de nitrógeno y oxígeno provenientes del precursor o la atmosfera, además de esto existen componentes inorgánicos responsables del contenido de ceniza [38].

En la investigación se demostró que el carbón activado puede tener un área superficial que oscila en un rango de $500 \text{ m}^2/\text{g}$ a $2000 \text{ m}^2/\text{g}$ e incluso llegar a los $3000 \text{ m}^2/\text{g}$. El área superficial depende de la porosidad que presente el material carbonoso. Según el principio de adsorción a mayor área superficial mejores serán las posibilidades de adsorber el adsorbato. Sin embargo, un parámetro de vital importancia es el tamaño de los poros, ya que este debe ser superior al del adsorbato para que su accesibilidad tenga varias alternativas y exista la posibilidad de adsorción [39].

3.1.2. Adsorción del carbón activado

Se denomina activado al carbón de origen vegetal o mineral que cuenta con materia carbonizada con un elevado grado de porosidad, grupos funcionales y una amplia área superficial que permiten la adsorción de moléculas en su superficie. El carbón activado es un adsorbente muy versátil debido al manejo de la distribución y el tamaño de sus poros en la estructura carbonosa lo que permite la aplicación tanto como en fase líquida como gaseosa [38].

Para la obtención del carbón activado existen dos procesos fundamentales: La activación del producto carbonizado y la carbonización de la materia prima la cual realizarse física o químicamente [40].

La adsorción es un fenómeno superficial que implica el aumento de la concentración de un determinado compuesto sobre la superficie de un sólido [13]. En nuestro caso la operación busca la separación de contaminantes en una corriente de agua por retención sobre la superficie del carbón activado.

“El fenómeno de la adsorción se conoce desde 1773, cuando el químico sueco Scheele observó que el carbón era capaz de retener varias veces su volumen de aire. Posteriormente, Lowitz en el

año 1785 describió la adsorción en fase líquida, al observar cómo el carbón era capaz de decolorar diversos líquidos” [13].

El área superficial de los carbones activados comerciales se encuentra en un rango de 500 m²/g y 1500 m²/g ya que presentan un carácter hidrófobo, la adsorción de sustancias orgánicas no polares se lleva a cabo con facilidad por el carbón activado, lo que implica su utilización en diferentes aplicaciones como la remoción de contaminantes en el aire y el agua. Además de esto se puede utilizar como catalizador por las reacciones catalíticas que se producen en su superficie [10].

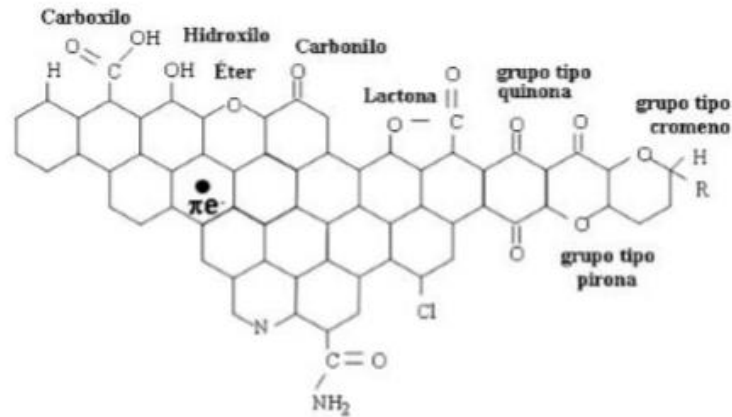
El carbón activado puede utilizarse en sistema de lecho fijo, que consisten en una columna de adsorción donde el adsorbente es depositado como un lecho en el interior y el líquido fluye a través de la columna con el fin de separar los contaminantes gradualmente [41].

La estructura y naturaleza química son propiedades que determinan la capacidad adsorptiva de los carbones activados, debido a que a lo largo de su estructura contienen grupos funcionales como oxígeno, nitrógeno o hidrógeno que se encargan de retener sustancias polares en la superficie [11].

“Los átomos de carbono de los planos basales, poseen orbitales π , que contienen electrones más o menos deslocalizados dentro de estos planos basales. La presencia o ausencia de los grupos superficiales, así como el mayor o menor grado de deslocalización de los electrones, afecta a las interacciones del carbón con otros elementos o compuestos” [10].

Figura 5.

Principales grupos funcionales del carbón activado



Nota. Principales grupos funcionales presentes en la superficie del carbón activado. Tomada de a. l. g. m.-w. r. Arrieta, “Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales,” 2016.

A partir de los siguientes parámetros se puede determinar la capacidad de adsorción de un carbón activado:

- Índice de yodo: Es una medida estándar para aplicaciones en fase líquida que permite caracterizar el funcionamiento del carbón activado a través de la medida del nivel de actividad y la medida del contenido de microporos en m²/g la cual es equivalente al área superficial del carbón activado.
- Índice azul de metileno: Es un ensayo de decoloración que determina la capacidad de adsorber meso y macromoléculas por un sólido [42].
- Densidad aparente: Es la relación de masa de carbón por unidad de volumen.
- Contenido de ceniza: Reduce toda la actividad del carbón activado y disminuye la eficiencia de reactivación.
- Medición de isotermas: Representación gráfica de la adsorción de N₂ en la superficie de un sólido

“La adsorción es una de las técnicas más empleadas en la remoción de colorantes, en virtud de la simplicidad del diseño, facilidad de operación y poca sensibilidad a las sustancias tóxicas. Los carbones activados, por su gran porosidad, son empleados ampliamente como adsorbentes en las operaciones industriales de purificación y recuperación química” [43].

Los experimentos de adsorción por lotes determinan la eficiencia en la eliminación de sustancias específicas, así mismo la capacidad máxima de adsorción. Dichos estudios se fundamentan en colocar en contacto determina cantidad de adsorbente con la disolución contaminada manteniéndola en suspensión mediante agitación hasta alcanzar condiciones de equilibrio. Generalmente los procesos industriales se desarrollan mediante procesos continuos [43].

3.1.3. Factores que influyen en la adsorción de contaminantes presentes en el agua

- El tipo de adsorbato a eliminar dependiendo de su peso molecular y su solubilidad, ya que a un elevado peso y baja solubilidad se eliminan con mayor facilidad.
- La concentración del contaminante a eliminar, debido a que a altas concentraciones los sitios activos del carbón activado no serán suficientes y se necesitarán mayores cantidades de carbón.
- Variedad de contaminantes presentes en el agua. Si se desea remover un contaminante en específico, pero existe una variedad de contaminantes, estos competirán por los sitios activos del carbón activado.
- El pH del agua. Por ejemplo, los compuestos ácidos se eliminan más fácilmente a pH bajos [44].

Algunos compuestos según su probabilidad de ser eficazmente adsorbidos por el carbón activo en el agua:

Tabla 4.*Compuestos con mayor probabilidad de ser eliminados por el carbón*

Alacloro	Desetilatracina	Malation
Aldrin	Demeton-O	MCPA
Antraceno	Di-n-butilftalato	Mecoprop
Antracina	1,2-Diclorobenceno	Metazaclor
Azinfos-etil	1,3-Diclorobenceno	2-Metilbencenamina
Bentazona	1,4-Diclorobenceno	Metilnaftaleno
Bifenil	2,4-Diclorocresol	2-Metilbutano
2,2-bipiridina	2,5-Diclorofenol	Monuron
Bis(2-etilexil) Ftalato	3,6-Diclorofenol	Naftaleno
Bromacil	2,4-Diclorofenoxi	Nitrobenceno
Bromodiclorometano	Dieldrin	m-Nitrofenol
p-Bromofenol	Dietilftalato	o-Nitrofenol
Butilbenceno	2,4-Dinitrocresol	p-Nitrofenol
Hipoclorito de calcio	2,4-Dinitrotolueno	Ozono
Carbofurano	2,6-Dinitrotolueno	Paration
Cloro	Diuron	Pentaclorofenol
Dióxido de cloro	Endosulfan	Propacina
Clorobenceno	Endrin	Simacina
4-Cloro-2-nitrotolueno	Etilbenceno	Terbutrin
2-Clorofenol	Hezaclorobenceno	Tetracloroetileno
Clorotolueno	Hezaclorobutadieno	Triclopir
Criseno	Hexano	1,3,5-Trimetilbenceno
m-Cresol	Isodrin	m-Xileno
Cinacina	Isooctano	o-Xileno
Diclohexano	Isoproturon	p-Xileno
DDT	Lindano	2,4-Xilenol
Deisopropiltatracina	Linuron	

Nota. Listado de compuestos con una probabilidad muy alta de ser eliminados por el carbón activado. Tomada de a. l. g. m.-w. r. Arrieta, “Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales,” 2016.

Tabla 5.

Compuestos con alta probabilidad de ser adsorbidos por el carbón activado

Anilina	Dibromo-3-cloropropano	1-Pentanol
Benceno	Dibromoclorometano	Fenol
Alcohol bencílico	1,1-Dicloroetileno	Fenilalanina
Acido benzoico	cis-1,2-Dicloroetileno	Acido o ftálico
Bis (1-cloroetil) éter	Trans-1,2-Dicloroetileno	Estireno
Bromo diclorometano	1,2-Dicloropropano	1,1,2,2, -Tetracloroetano
Bromo formo	Etileno	Tolueno
Tetracloruro de carbono	Hidroquinona	1,1,1 - Tricloroetano
1 - Cloro propano	Metil Isobutil Ketona	Tricloroetileno
Clorotoluron	4-Metilbencenammina	Acetato de vinilo

Nota. Compuestos con alta probabilidad de ser adsorbidos por el carbón activado. Tomada de a. l. g. m.-w. r. Arrieta, “Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales,” 2016.

Tabla 6.

Compuestos con probabilidad moderada de ser eliminados por el carbón activo

Ácido acético	Dimetoato	Metionina
Acrilamida	Etil acetato	Metil - tert - butil éter
Cloro etano	Etil éter	Metil etil ketona
Cloroformo	Freón 11	Piridina
1,1 - Dicloro etano	Freón 113	1,1,2 - Tricloroetano
1,2 - Dicloro etano	Freón 12	Cloruro de vinilo
1,3 - Dicloro propeno	Glifosato	
Dikegulac	Imazipur	

Nota. Para estos compuestos el carbón activo es una tecnología efectiva sólo en ciertos casos. Tomada de a. l. g. m.-w. r. Arrieta, “Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales,” 2016.

Tabla 7.

Compuestos para cuya eliminación no es probable que el carbón activo sea efectivo

Acetona	Cloruro de metileno
Acetonitrilo	1 - Propanol
Acrilonitrilo	Propionitrilo
Dimetilformaldehido	Propileno
1,4 - Dioxano	Tetrahidrofurano
Isopropil alcohol	Urea
Cloruro de metilo	

Nota. Sin embargo, si lo es en ciertos casos en los que el flujo o la concentración del compuesto son muy bajos. Tomada de a. l. g. m.-w. r. Arrieta, “Obtención de carbón activado a partir de activación química de pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales,” 2016.

3.1.4. Sistema discontinuo o por lotes

En el sistema por lotes se mezcla una cantidad de agua con una determinada de adsorbente durante un periodo de contacto, posterior a esto se separa por sedimentación o filtración [45].

El carbón activado se agrega en agua cruda para disminuir contaminantes específicos, el punto óptimo de aplicación debe permitir una adecuada dispersión del carbón y suficiente tiempo de contacto para asegurar la máxima adsorción [45].

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizó una recolección de información para el desarrollo del diseño de experimentos donde se analizaron 8 artículos para determinar el tiempo de contacto, la velocidad de agitación y las concentraciones para el desarrollo del sistema por lotes.

Tabla 8.
Resumen artículos

Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	Contaminante del agua	Concentración gr/L	Autor	Tipo de Bioadsorbente
120	90	Fenol	50	Malakootian - Mansoorian - Alizadeh - Baghbanian	Aloe vera- Mezquite
120	180	Arsénico	10	Cardozo- Catone- Alves Pinto- Taylor-	Lignocelulosa
500	30	Pigmento tóxico catiónico	20	Chandradat- Lam-Liu- Leung- Keating- Sunasee	Nano cristales de celulosa a base de madera

Tabla 8. Continuación

500	60	Colorante	25	Tyagi	Carbón activado devetiveria zizanioides
120	180	Colorantes catiónicos	20	Hasan- Shenashen- Hasan- Znad- Salman- Awual Solís- Morales-	Bioadsorbentes poliméricos
350	45	Jugos de caña	20	Télez- Ayala- Durán	Carbón activado de residuos agroindustriales
120	720	Colorante	30	Grisales- Rojas Cardozo-	Carbón activado de pulpa de café
250	1440	Arsénico	30	Catone- Alves	Lignocelulosa

Nota. Tabla resumen de los 8 documentos para realización del diseño de experimentos

Posteriormente a la selección del tipo de sistema para la realización del tratamiento se seleccionaron las variables más importantes para el análisis de la calidad del agua.

3.1.5. Selección de variables de diseño

Mediante la búsqueda bibliográfica de los 8 documentos, se determinaron ciertos valores promedio para las variables independientes como la concentración, el tiempo y la velocidad de agitación utilizando las medidas de tendencia central (media, mediana y moda) con los valores de la tabla 9 para obtener los rangos óptimos de desarrollo y de esta manera bajo el diseño de experimentos realizar el debido tratamiento de aguas.

Tabla 9.*Resultados medidas de tendencia central*

	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	Concentración (g/L)
Media	260	343.125	25.625
Mediana	185	135	22.5
Moda	120	180	20

Nota. Se presenta la tabla de resultados de las medidas de tendencia central para las variables independientes del diseño de experimentos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se escogió un valor aproximado entre la mediana y la moda para la velocidad de agitación del tratamiento de 150 rpm, al ser necesarios dos tiempos para desarrollar el tratamiento se escogieron los valores de mediana y moda ya que la media al ser un valor alejado y al no conocerse el tiempo de saturación del carbón activado puede generar inconvenientes en la remoción de contaminantes por el desprendimiento de partículas de la superficie del carbón. Finalmente, para la concentración se escogieron valores de 20, 25 y 30 g/L para establecer la influencia significativa en las variables de respuesta.

3.1.6. Selección agua a tratar

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la revisión bibliográfica, existen factores que influyen en la adsorción de contaminantes presentes en el agua como la composición de laca nitro celulósica la cual contiene componentes afines al carbón activado como lo son el tolueno, xileno y los colorantes [46]. Para este proyecto el uso del agua residual del molino de chip es favorable ya que presenta contaminantes con muy alta probabilidad de ser eliminados por el carbón activado.

3.1.7. Turbidez

La calidad del agua se puede determinar mediante la turbidez, ya que esta es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia por la presencia de material particulado en suspensión [47].

Un valor elevado de este parámetro puede representar un riesgo ya que hacer referencia al acantonamiento de microorganismos los cuales generan un aumento en la resistencia hacia los desinfectantes. Según la procedencia del agua puede contener material orgánico que puede inhibir los agentes biocidas lo cual genera reacciones que forman compuestos peligrosos para el ser humano [48].

“Los valores de turbidez sirven para establecer el grado de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua” [35].

3.1.8. Color

El color del agua está asociado generalmente a la presencia de material colorante, existen dos parámetros de medida para el color; el primero corresponde al verdadero el cual se manifiesta en el agua después de remover la materia suspendida y el segundo al color aparente el cual es el resultante entre el color verdadero y cualquier otro color que produzcan las sustancias en suspensión, es expresado en unidades de color o unidades platino cobalto [47].

El color como un parámetro organoléptico indica la calidad del agua para el consumo humano, está directamente relacionado con sustancias altamente disueltas y partículas en suspensión. El color es medido principalmente para determinar el nivel de materia orgánica natural existente en el agua, ya que su presencia genera un factor de riesgo de generación de subproductos nocivos de la desinfección del agua como lo puede ser los trihalometanos [49].

3.1.9. pH

El pH es un factor operativo clave para determinar la calidad del agua, ya que un agua con tendencia acida tiene la capacidad de disolver los metales empleados en las conducciones los cuales al ser ingeridos afectan negativamente la salud, es importante mencionar que existe un rango óptimo de pH del agua para el consumo humano el cual varía entre 6.5 a 8.5 [50].

3.1.10. Conductividad

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene el agua para el transporte de corriente eléctrica, está relacionada con la concentración de sales en disolución que originan iones libres los cuales tienen la capacidad de transportar la corriente eléctrica [51]. La solubilidad de las sales en el agua depende de los tipos de contaminantes que posea esta, la temperatura del agua y el tratamiento que se le aplique al agua.

3.2. Pruebas fisicoquímicas para determinar la capacidad de adsorción del carbón activado

En esta etapa se realizaron las pruebas de caracterización del carbón activado siguiendo la NTC 4467 “Productos químicos industriales, carbón activado, métodos de ensayo” para determinar la capacidad de adsorción que posee el carbón activado proveniente del bambú de la especie *Chusquea Scandens Kunth*.

Se realizó una revisión bibliográfica de 9 artículos para la recolección de resultados los cuales son:

Tabla 10.
Resumen de resultados

Autores	Tipo de carbón activado	Índice de yodo (mg/g)	Área superficial (m ² /g)	Azul de metileno (mg/g)	Densidad Aparente (g/mL)	%Cenizas	%Humedad
Carrasco Tito - Londa Veletanga. Prias	Cáscara de coco “Cocos Nucífera L”	627.76	660.287	0	0.6548	0.884	11.87
Barragan - Echeverry Montoya - Ariza Calderon. Grisales	Guadua angustifolia Kunth	0	408	0	0	0	0
Motato - Rojas Arrieta. Ospina	Pulpa de café	686.05	0	0	0.27	17.98	2.75
Guarin- Buitrago Sierra	Torta de higuera	0	879.02	0	0	8.97	46.46

Tabla 10. Continuación

Celíz – Forneris. Castellar - Angulo - Zambrano – Charris.	Carozos de aceitunas	460	0	5.4	0.34263	0	10.4
	Normal Granular	0	631	0	0	13.7	15.24
Cubillos Pita.	<i>Chusquea Scandens Kunth</i>	998.1	0	630.2	2,11	0	0
Castellar - Cardozo - Suarez - Vega.	Normal granular	0	586	0	0	14.5	5.9
Zambrano.	Phytelephas aequatorialis	0	0	0	0.54	0.6	5.15

Nota. Tabla resumen de resultados obtenidos de la caracterización de carbones activados vegetales.

3.2.1. Ensayo determinación número de yodo

Siguiendo los pasos indicados en la norma utilizada se obtuvieron los datos necesarios para determinar el índice de yodo, la cual es una expresión que permite medir indirectamente el área superficial de los carbones activados, a partir de los miligramos de yodo adsorbidos por gramo de carbón activado [52].

Figura 6.
Ensayo número de yodo



Nota. Filtración solución de yodo con carbón activado.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 11.
Datos número de yodo

Peso muestra (g)	N1	N2	A	B	C	D	(X/M)	NI
0.65	0.0733	0.09	571.185	9.305	0.025	0.965	576.381	556.208

Nota. Tabla resumen de datos para el cálculo del número yodo.

N1 = Normalidad de la solución de yodo.

N2 = Normalidad de la solución de tiosulfato de sodio.

$\frac{X}{M}$ = mg de yodo adsorbidos por gramo de carbón

A = Normalidad de solución de yodo \times 6436.5

B = Normalidad de solución de tiosulfato de sodio \times 126.93

C = Normalidad de residuo filtrado

D= normalidad de residuo filtrado © corregido

NI= número de yodo corregido.

La NTC 4467 indica que para el peso de carbón activado utilizado el índice de yodo (NI) debería estar en un rango de 680 a 780 mg de yodo por gramo de carbón, teniendo en cuenta esto el carbón no adsorbió una cantidad esperada de yodo, partiendo del principio de adsorción, el área superficial del carbón activado no disponía de los suficientes sitios activos para adsorber una mayor cantidad de yodo, a pesar de ser rica en micro poros, los cuales son utilizados en la adsorción de yodo.

3.2.2. *Densidad aparente del carbón activado*

La densidad aparente es la relación de masa de carbón por unidad de volumen lo que indica que al presentar una mayor densidad aparente, la capacidad para eliminar un adsorbato por unidad de volumen de un adsorbente será mayor [53].

Figura 7.

Ensayo densidad aparente



Nota. Volumen del carbón activado para el cálculo de la densidad aparente.

Inicialmente se realizó el ensayo de determinación de humedad de carbón activado, para poder calcular la densidad aparente.

Tabla 12.

Datos densidad aparente

%Hum (CA)	Peso de la muestra densidad (g)	Volumen de la muestra (m3)	Densidad Aparente (g/mL)
15.855	10	1.30E-05	0.647

Nota. Tabla resumen de datos para el cálculo de la densidad aparente.

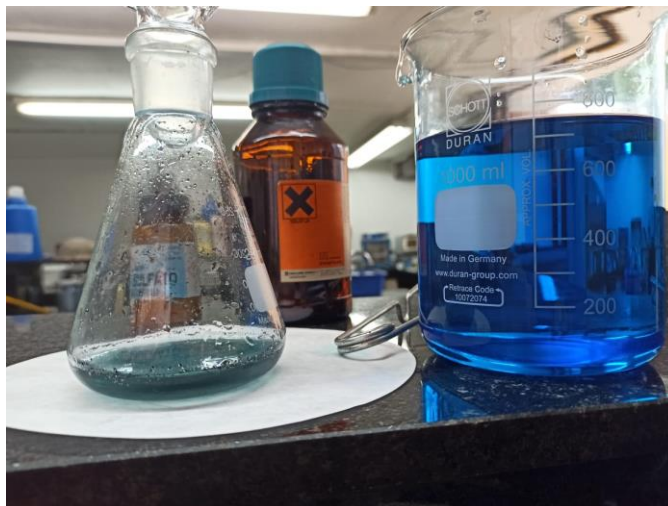
Teniendo en cuenta la norma ASTM D 2854 que indica el rango general de 0.26 a 0.65, es una densidad aparente alta será mayor su capacidad de eliminación de los adsorbatos por unidad de volumen de un adsorbente. Siendo esta una propiedad intrínseca de los carbones es muy importante para determinar la eficiencia del mismo, ya que a menor volumen ocupe un carbón por masa específica existe mayor adsorción con respecto a otros carbones que presenten una densidad superior.

3.2.3. Determinación del índice de azul de metileno

Jyotsna publicó en uno de sus más recientes informes que el azul de metileno es fácilmente removible del agua utilizando carbón activado [54]. Es de importancia la remoción de este pigmento en los cuerpos de agua, debido a que puede causar daños a los suelos, fauna y flora.

La adsorción de azul de metileno depende directamente de la cantidad de macroporos y mesoporos que se encuentren en el área superficial del carbón activado.

Figura 8.
Ensayo índice de azul de metileno



Nota. Solución de azul de metileno en carbón activado.

Tabla 13.
Índice de azul de metileno

Índice de azul de metileno (mg/g)
220.6

Nota. Resultado de adsorción de azul de metileno.

Teniendo en cuenta a Cubillos Pita quien obtuvo una adsorción de 630.2 mg/g y siguiendo el principio de adsorción de azul de metileno, se analiza que es un resultado bajo debido a que el carbón activado es rico en micro poros pero posee pocas existencias de macro y meso poros dificultando la adsorción del reactivo.

3.2.4. Porcentaje de humedad

La variación de la humedad está relacionada directamente con el carácter hidrófilo y variación del pH [55].

Se realizó el ensayo de porcentaje de humedad como lo indica la NTC 4467, obteniendo como resultado:

Tabla 14.
Porcentaje de humedad

%Hca
15.855

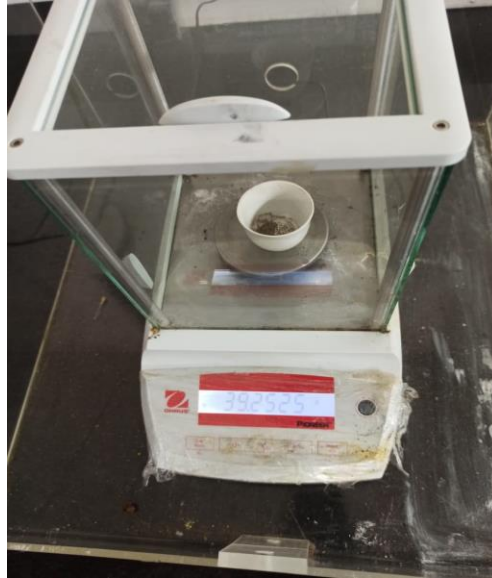
Nota. Resultado
porcentaje de humedad
del carbón activado.

Entre mayor contenido de carbono presente el material, mayor capacidad de absorber humedad tendrá. Las especificaciones de calidad limitan generalmente el contenido de humedad alrededor del 5-15% del peso bruto del carbón vegetal [56]. El resultado de humedad obtenido supera el límite general, lo cual implica que no es recomendable para ciertos usos e industrias debido a la afectación del poder calorífico del carbón en procesos de combustión. De esta manera una alta humedad genera problemas de adsorción como se evidencia en los resultados obtenidos durante la caracterización del índice de yodo y azul de metileno que estuvieron fuera de los intervalos reportados [44]. El porcentaje de humedad puede variar dependiendo del tipo de materia de prima de la cual es elaborado el carbón activado como se evidencia en la tabla 10 donde se obtienen resultados variados con un 71.42% dentro del rango general.

3.2.5. Contenido de ceniza

El contenido o porcentaje de ceniza en un carbón vegetal se ubica en un rango entre 0.5 a 5%, este valor depende de la especie de madera, la cantidad de corteza que incluya y la cantidad de contaminación con arena y tierra. Normalmente, un gran porcentaje de carbón vegetal puede presentar un valor de contenido de ceniza alrededor del 3% [56]. El carbón activado vegetal al presentar un proceso de activación tiende a aumentar su contenido de ceniza dependiendo del tipo de activación que presente, ya que por medio de la activación física se realiza una carbonización que aumenta el contenido de ceniza final.

Figura 9.
Ensayo contenido de ceniza



Nota. Peso contenido de cenizas del carbón activado.

Partiendo de lo anterior se analiza que se obtuvo un contenido de ceniza alto, dado que se utilizó un carbón fino obteniendo un resultado de:

Tabla 15.
Porcentaje de ceniza

Ceniza	6.39%
--------	-------

Nota. Porcentaje de ceniza del carbón activado

El contenido de ceniza depende del tamaño del carbón activado como se evidencia en la tabla 10 en la cual hubo una variación de datos 0.6- 17.98%, los cuales se obtuvieron con diferentes tipos de carbón activado y tamaños.

3.2.6. pH del carbón

Esta técnica se basa en la medida de la diferencia de potencial originada por la disolución en agua destilada de sustancias presentes en el carbón activado y permite conocer el pH de cualquier carbón activado, en polvo o granular.

Figura 10.
Ensayo pH del carbón activado



Nota. pH del carbón activado.

Tabla 16.
pH del carbón activado

pH carbón	4.9
-----------	-----

Nota. Resultado pH carbón activado.

3.2.7. Isotermas de Adsorción

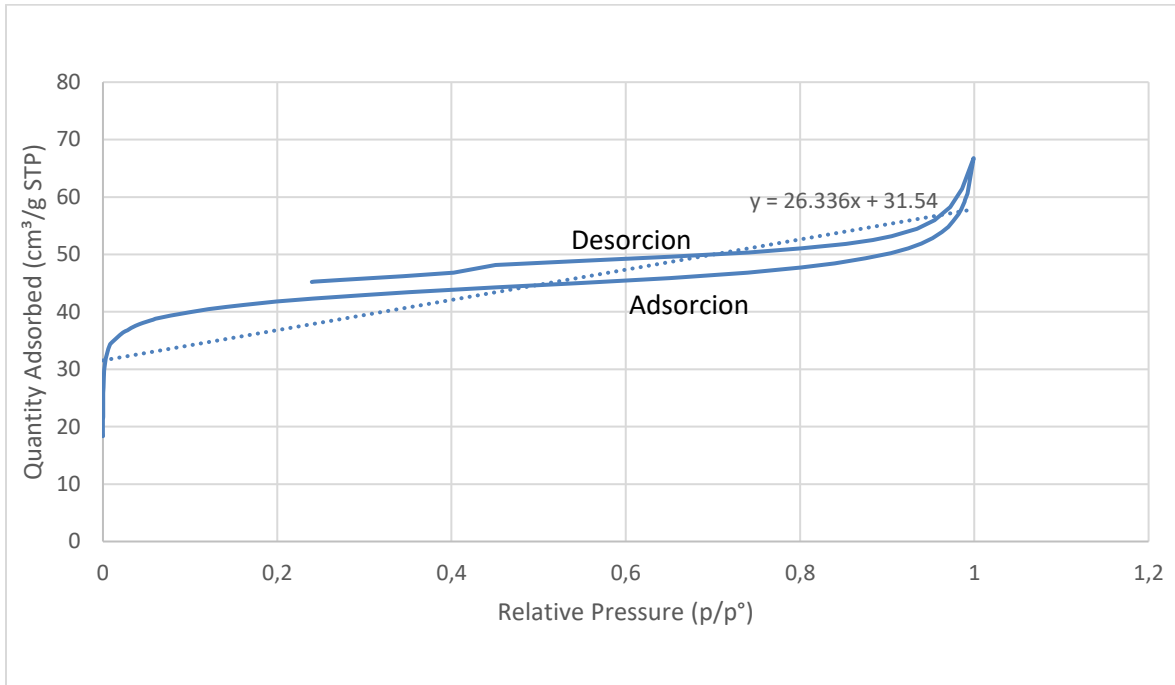
Este ensayo fue realizado por el departamento de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia.

Esta se basa en la capacidad de adsorción de un sólido como el carbón activado en retener moléculas como el N₂ en su superficie porosa, a una temperatura constante en función de la presión relativa del gas en contacto. El grafico característico de esta medida, de cantidad de volumen de gas adsorbido por el sólido, es la isoterma de adsorción, la cual se puede desarrollar por diferentes métodos. La cual basa su análisis en la temperatura normal de saturación del gas nitrógeno (77 °K), sobre la superficie del solido [27].

La adsorción ocurre inicialmente por formación de una monocapa de agua alrededor de los enlaces iónicos de la superficie del producto seguida de una adsorción en multicapas mediante enlaces débiles.

A continuación, se presentan los resultados de isothermas de adsorción.

Figura 11.
Nitrogen adsorption isotherm



Nota. Se presenta la isoterma de adsorción – desorción.

La isoterma de adsorción – desorción de nitrógeno para el carbón activado se presenta en la figura 11. En todo el proceso se analiza un aumento lento de adsorción, desde las presiones más bajas hasta la presión relativa de 0.6 se evidencia la adsorción en la monocapa, posterior a esta presión se realiza la adsorción de multicapa. En la desorción se puede ver un proceso de histéresis H4, que es característico en sólidos con mesoporos. Teniendo en cuenta la forma de la isoterma de adsorción se puede afirmar que es una isoterma tipo IV, partiendo de este ensayo y teniendo en consideración los demás ensayos de adsorción, se afirma que el carbón activado proveniente del bambú de la familia *Chusquea Scandens Kunth* posee una variación de poros siendo esta una mezcla entre micro, meso y macro, donde se evidencia una mayor cantidad de microporos.

El índice de yodo es una medida indirecta de la microporosidad, así mismo, el índice de azul de metileno revela tamaños mayores de poro desarrollados durante la activación [57]. Aunque el área superficial sea rica en microporos no alcanza una adsorción dentro del rango general, por lo cual se entiende que la amplitud del área superficial no es lo suficientemente alta.

Según datos de la tabla 17 el 69.64% del área superficial del carbón activado es ocupada por microporos, por lo cual es entendible el resultado bajo de adsorción de azul de metileno ya que no hay suficientes meso y macro poros en el área superficial que representen una alta adsorción.

A continuación, se presenta la tabla resumen de los datos obtenidos con el ensayo de adsorción de Nitrógeno.

Tabla 17.
Resumen resultados isotermas

<i>Single point surface area at $p/p^{\circ} = 0.299813132$:</i>	130.878 m ² /g
<i>BET Surface Area:</i>	128.641 m ² /g
	163.4710
<i>Langmuir Surface Area:</i>	m ² /g
<i>t-Plot Micropore Area:</i>	91.147 m ² /g
<i>t-Plot External Surface Area:</i>	37.494 m ² /g
<i>BJH Adsorption cumulative surface area of pores between 1.7000 nm and 100.0000 nm diameter:</i>	16.124 m ² /g
<i>BJH Desorption cumulative surface area of pores between 1.7000 nm and 100.0000 nm diameter:</i>	19.316 m ² /g

Nota. Resultados ensayo de adsorción de N₂ a 77 °K.

Se realizó la comparación con otros carbones activados y se analiza que el área superficial de este es baja, teniendo en cuenta que la adsorción esta meramente relacionada con el área superficial, se afirma que una buena adsorción dependerá de otros factores como el tipo de adsorbato, tiempo, velocidad de agitación, temperaturas entre otros que pueden aumentar la capacidad de adsorción del adsorbente.

3.3. Análisis de viabilidad en el tratamiento de aguas

Inicialmente para proceder con el desarrollo del tratamiento fue necesario realizar el diseño de experimentos donde los factores considerados fueron la concentración inicial de adsorbente y tiempo de agitación. Las variables respuesta fueron porcentajes de remoción de turbidez y color.

Los experimentos se realizaron en un test de jarras, manteniendo fija la velocidad de agitación en 150 rpm. El tiempo de agitación fue de 135 y 180 minutos, suficiente para alcanzar condiciones de equilibrio.

El agua se recaudó en la ciudad de Bogotá a la salida directa de un molino de chip en el proceso de producción de pigmentos para la industria automotriz con base nitrocelulosa mediante un muestreo puntual el día 9 de marzo del año 2021 a las 11:00 AM

3.4. Resultado de variables pre y post tratamiento

En esta sección se encontrarán los resultados de las pruebas realizadas al agua y el análisis de las mismas, estas pruebas se realizaron para determinar la viabilidad de un tratamiento de aguas con el uso del carbón activado de la familia *Chusquea Scandens Kunth* como adsorbente de contaminantes.

Tabla 18.
Resumen ensayos realizados pre y post tratamiento

ENSAYO	Entrada	Salida	% remoción
TURBIDEZ			
NTU/FNU	22.34	6.4	71.352
Conductividad ($\mu\text{s/cm}$)	704	629	10.653
Absorbancia	0.818	0.357	56.357
Longitud (nm)	328	326	-
Hidrocarburos (mg/L)	31.6	0.5	98.418
SST (mg/L)	0.631	0	100
Color verdadero (Pt-Co)	80	55	31.250
pH	7.14	8.3	-
DQO (mg/L)	778	490	37.018

Nota. Resultados ensayos de caracterización.

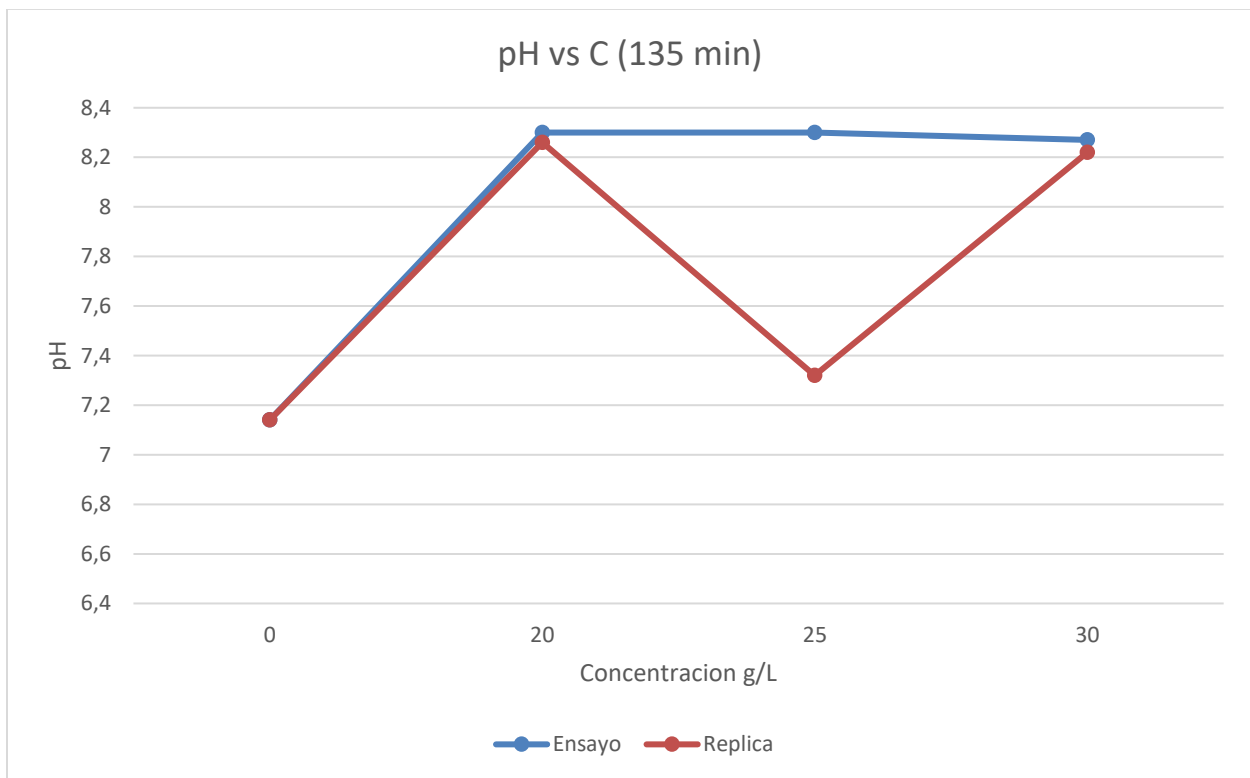
En la tabla 18 se presenta el resumen de los resultados obtenidos durante la experimentación, su valor inicial, final y su porcentaje de remoción, cada prueba será analizada y explicada a continuación.

3.4.1. Determinación de pH

El pH es un indicador de la calidad del agua, ya que con este valor se puede determinar el grado de toxicidad del agua. Teniendo en cuenta la Resolución 0631 de 2015 los valores aceptables para el pH son entre 6 y 9 [19].

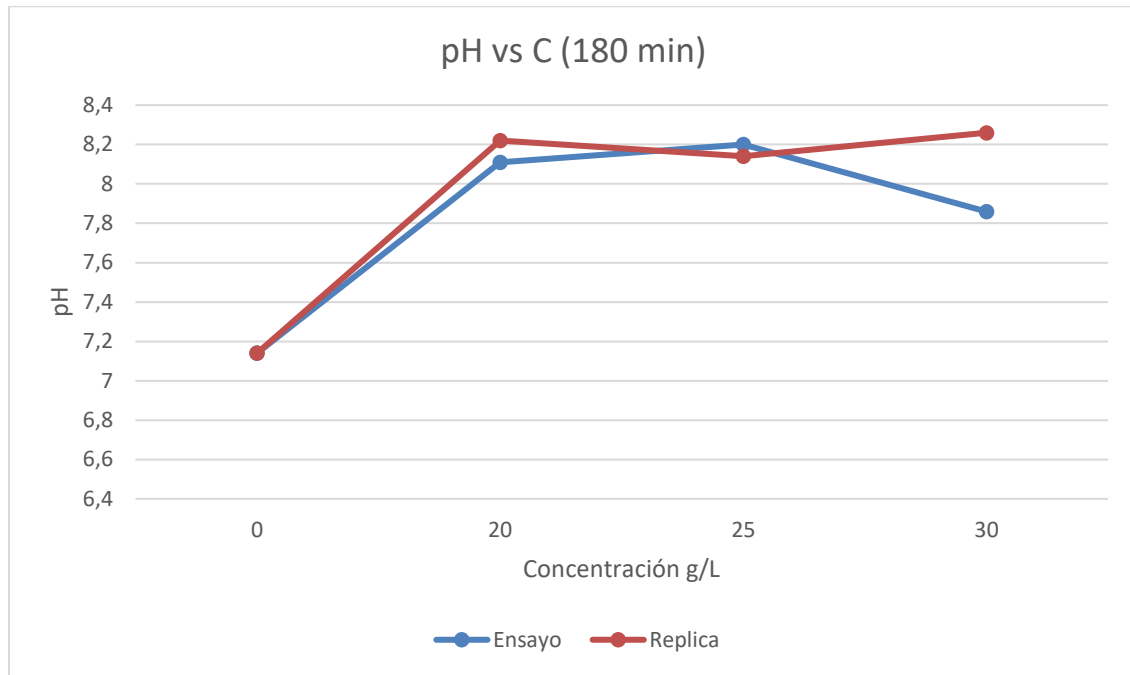
En los siguientes gráficos se muestran los resultados de pH que varían en un intervalo de 8.2-8.3 desde una concentración de 0 g/L de carbón activado hasta 30 g/L a los dos diferentes tiempos de agitación.

Figura 12.
pH vs C (135 min)



Nota. En el gráfico se presenta la relación entre el pH y la concentración a un tiempo de 180 min de agitación.

Figura 13.
pH vs C (180 min)



Nota. En el gráfico se presenta la relación entre el pH y la concentración a un tiempo de 180 min de agitación.

Analizando los anteriores gráficos se evidenció un incremento del pH en un rango de 8.2 -8.3 para un tiempo de 135 min y de 7.8 – 8.2 para uno de 180 min. Esto puede ocurrir dado que las materias primas vegetales contienen cantidades de cationes como el sodio, potasio, calcio, entre otros, que, en el proceso de carbonización, permanecen en el carbón en forma de óxidos. Al entrar en contacto con el agua, los óxidos retenidos se convierten en hidróxidos disolviéndose y aumentando el pH como se evidencio en los resultados [58].

3.4.2. Conductividad

Este análisis se realizó con el objetivo de evidenciar la presencia de electrolitos disueltos, ya que el agua pura no debería presentar conductividad eléctrica alguna, por su ausencia de electrolitos, a diferencia del agua potable, que presenta algunos electrolitos disueltos [59].

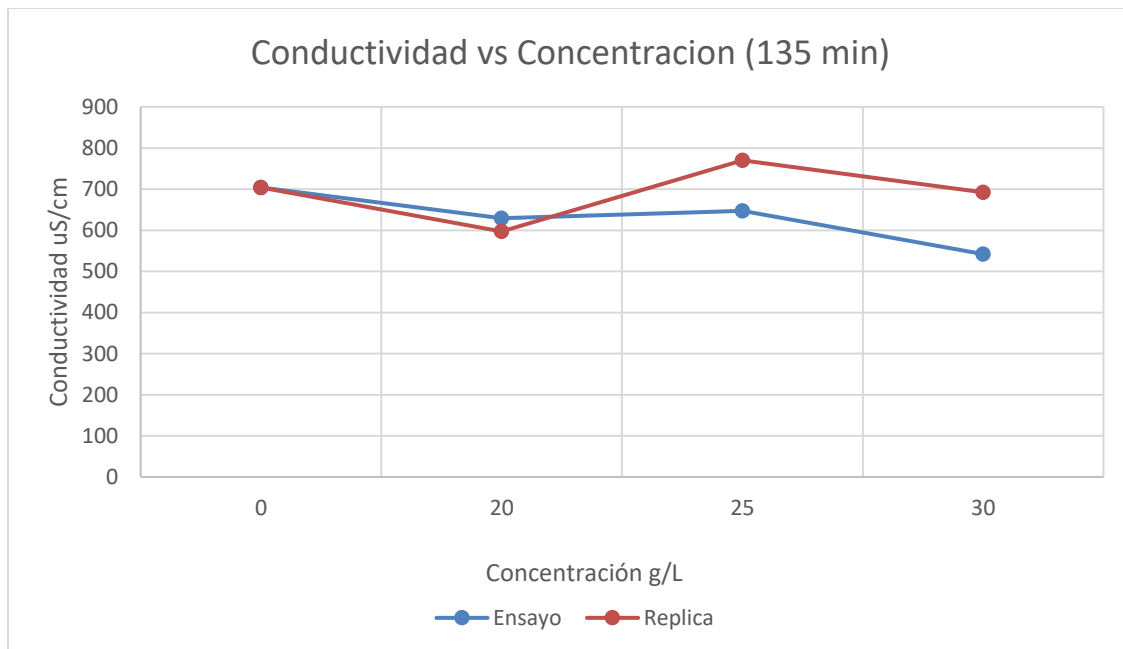
A continuación, se presentan los gráficos de conductividad de agua pre y post tratamiento a las diferentes concentraciones del tratamiento.

Figura 14.
Ensayo conductividad



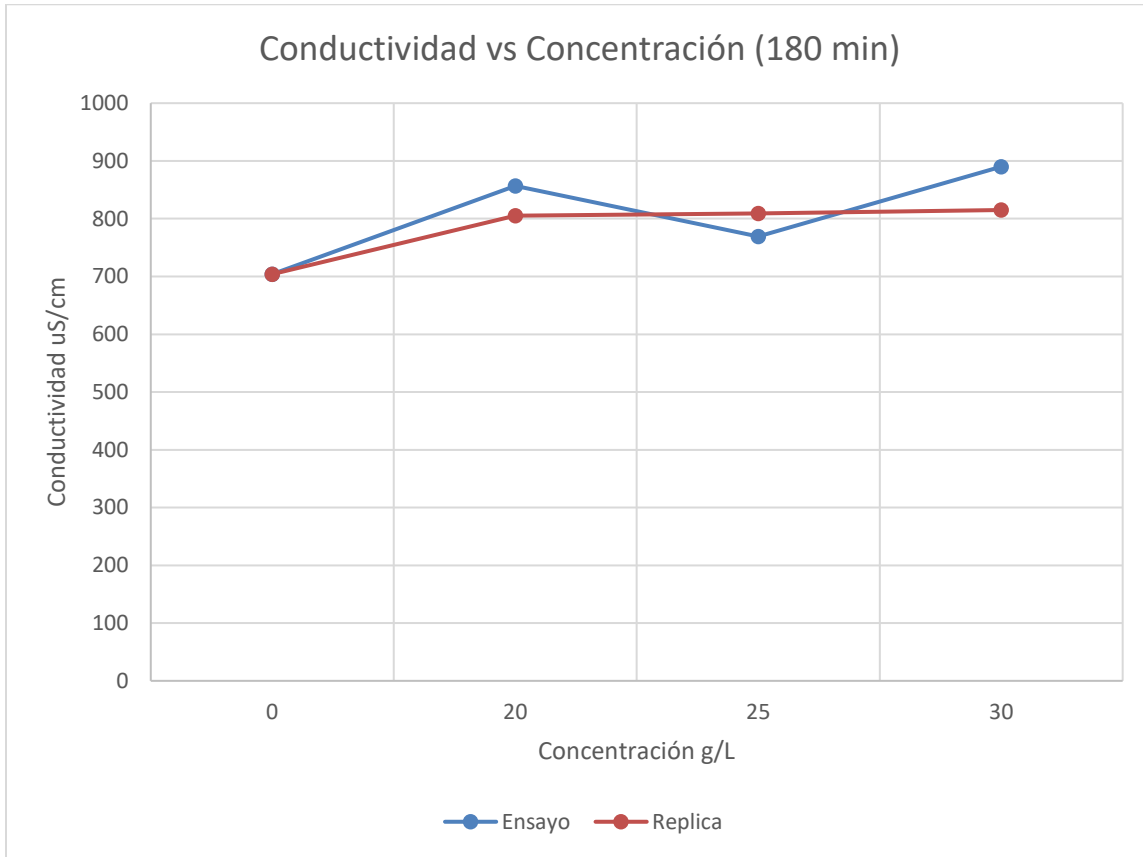
Nota. Conductividad del agua ensayo 1 con una concentración de 25 g/L

Figura 15.
Conductividad vs Concentración (135 min)



Nota. Se presenta el gráfico de conductividad vs concentración a 135 min de agitación con los dos ensayos realizados.

Figura 16.
Conductividad vs Concentración (180 min)



Nota. Se presenta el gráfico de conductividad vs concentración a 180 min de agitación con los dos ensayos realizados.

El agua potable posee normalmente una conductividad entre 5-50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ por la cantidad de iones disueltos que contiene, al analizar estos gráficos se evidencia que el agua cruda posee una cantidad de electrolitos muy alta, post tratamiento el mejor resultado fue de 542 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el ensayo número 1 con una concentración de 30 g/L a un tiempo de 135 min, las variaciones en los resultados se pueden producir a raíz de la saturación del carbón activado, lo cual puede generar la formación de iones disueltos aumentando la conductividad del agua.

3.4.3. Turbidez

La turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz sea desviada y absorbida y no siga en línea recta a través de la muestra. La correlación de la turbiedad con la concentración

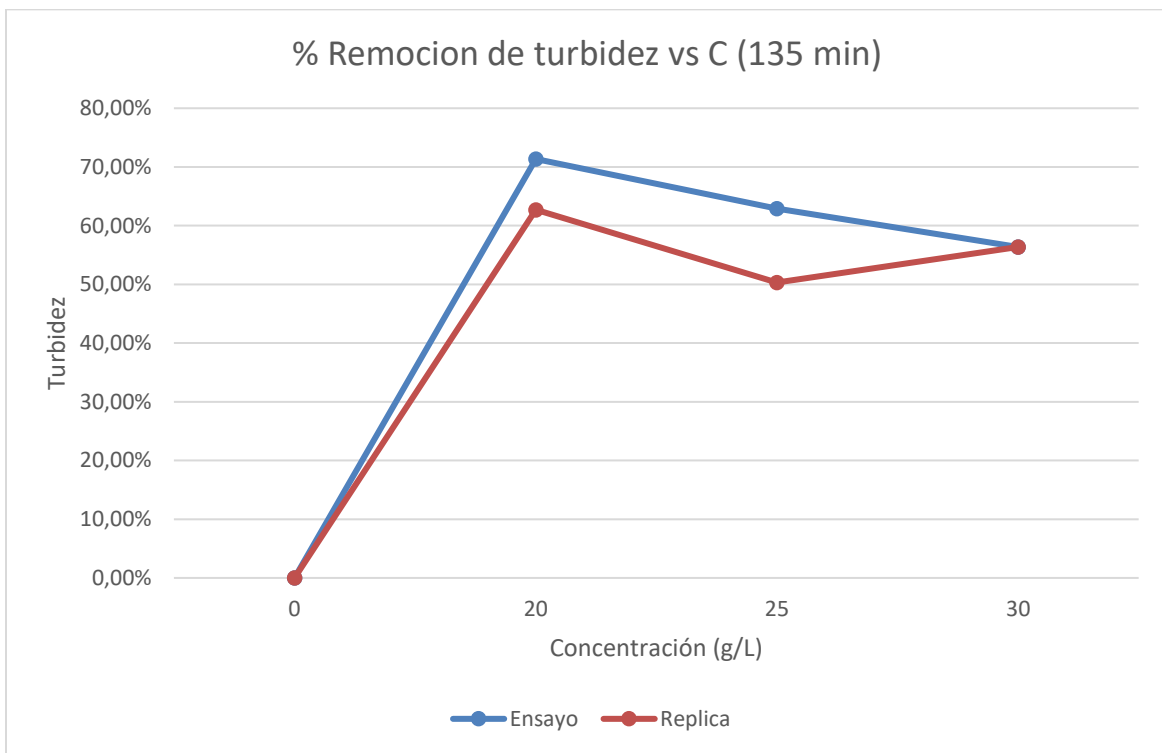
en peso de la materia suspendida es difícil debido a que el tamaño, forma e índice refractivo de las partículas también afecta las propiedades de la luz desviada de la suspensión [47].

Terminado el tratamiento de agitación con carbón activado se procedió a realizar una filtración debido a que el carbón activado al ser una partícula oscura aumentaría la turbidez en gran medida.

La adsorción de color y la filtración posterior son factores claves para la remoción de turbidez en el agua. Teniendo en cuenta la OMS, la turbidez en el agua para el consumo humano tiene un valor máximo permisible de 5 NTU y su valor ideal será por debajo de 1 NTU.

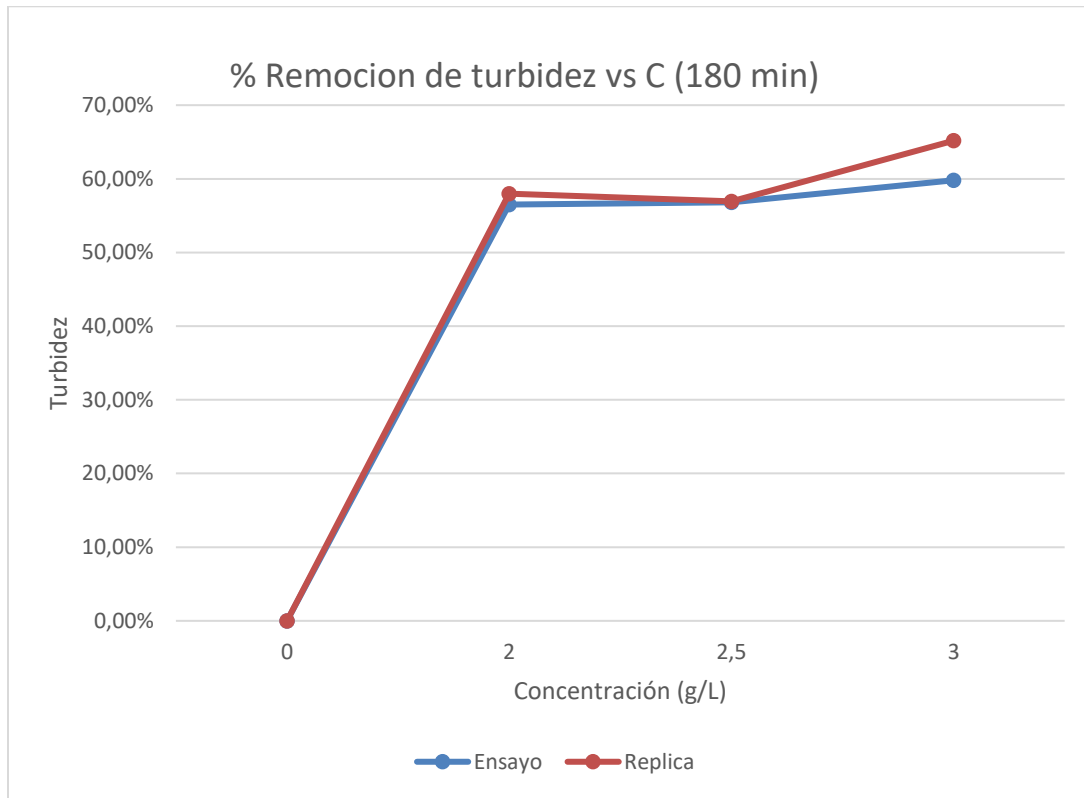
A continuación, se presentan los resultados de porcentajes de remoción de turbidez obteniendo como mejor respuesta un 71.35% de remoción.

Figura 17.
Porcentaje remoción de turbidez vs C (135 min)



Nota. Se presenta el grafico de remoción de turbidez vs concentración a 135 min de agitación con los dos ensayos.

Figura 18.
Porcentaje remoción de turbidez vs C (180 min)



Nota. Se presenta el gráfico de remoción de turbidez vs concentración a 135 min de agitación con los dos ensayos.

Analizando los resultados se evidencia que la remoción de turbidez en el agua fue efectiva, en ambos casos el porcentaje de remoción estuvo por encima de un 50%, al obtener estos resultados siendo un tratamiento terciario, facilitara la remoción de turbidez para procesos primarios y secundarios, ya que al tratar aguas con una turbidez muy alta es necesario procesos complejos y costosos.

3.4.4. Remoción de color

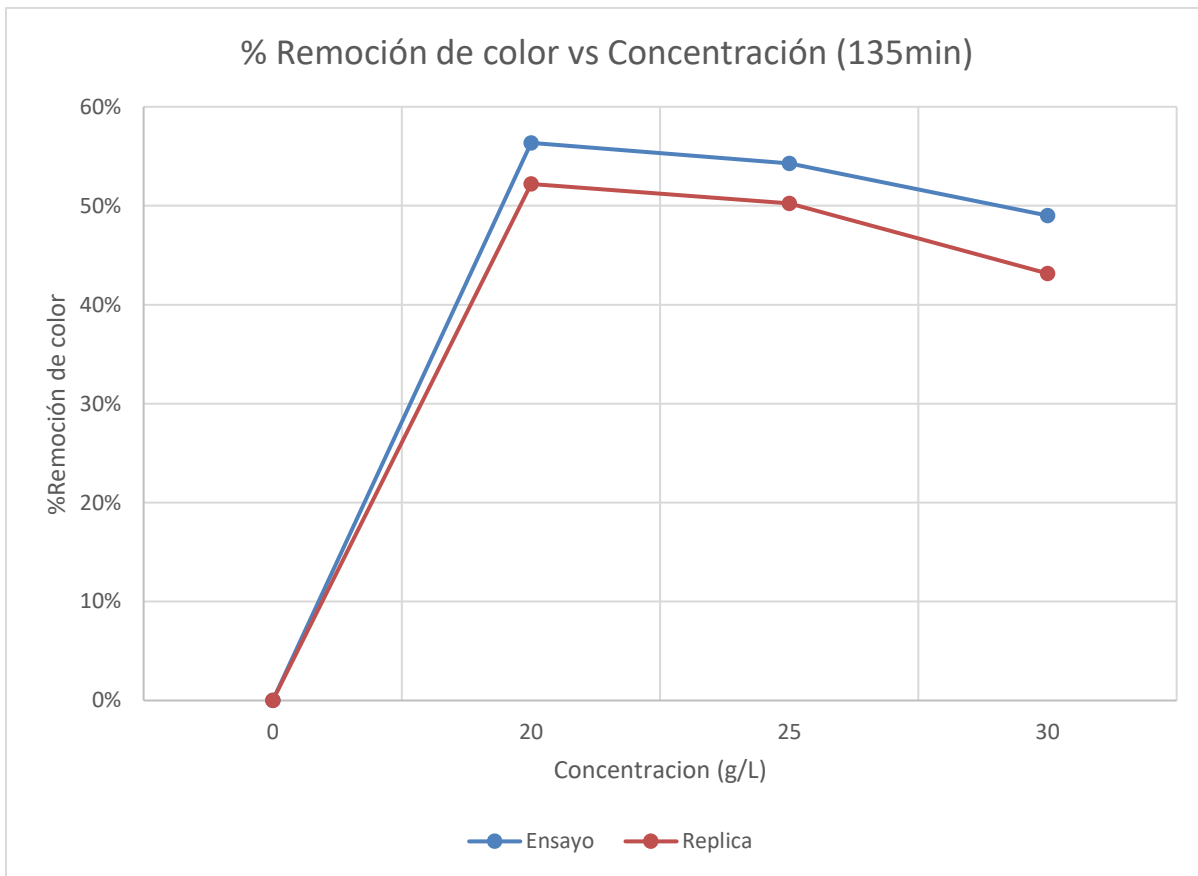
El color puede ser removido de aguas residuales por métodos físico- químicos que incluyen: absorción, coagulación- floculación, oxidación y métodos electroquímicos. [60]

Durante la experimentación la variable medida fue el porcentaje de remoción de color a una longitud de onda con un valor de 328 nm, la cantidad de carbón activado varió en un intervalo de

20-25 y 30 gr/L como se explicó previamente en el diseño de experimentos. Se midió la reducción de longitud de onda presente, por la facilidad de medición de estos parámetros y la relación que puede tener la remoción de color con la disminución de DQO con cada experimento [61]

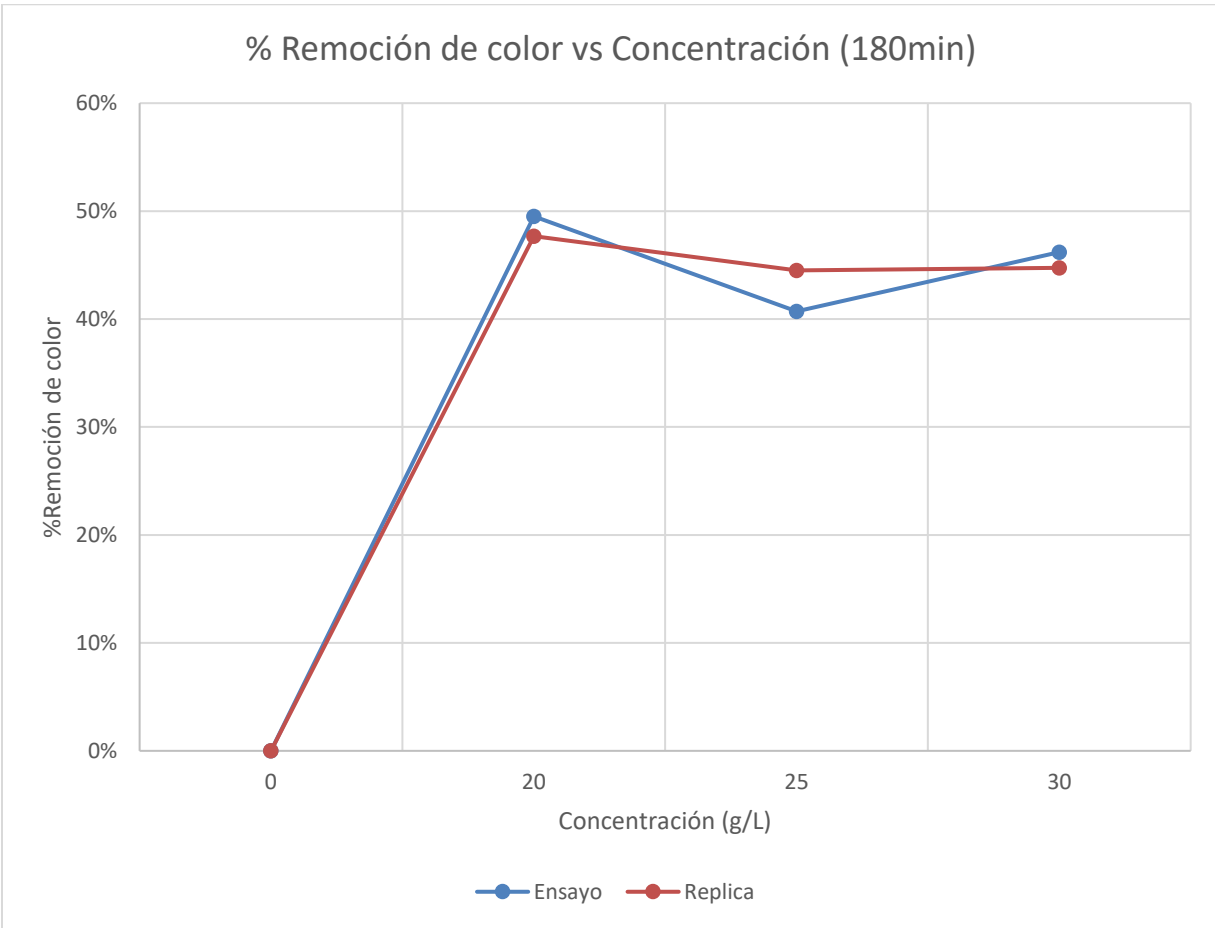
A continuación, se presentan los gráficos de remoción de color obtenidos en los diferentes tiempos y concentraciones.

Figura 19.
Porcentaje remoción de color vs Concentración (135min)



Nota. Se presenta el gráfico de remoción de color vs concentración a 135 min de agitación con los dos ensayos.

Figura 20.
Porcentaje remoción de color vs Concentración (180min)



Nota. Se presenta el gráfico de remoción de color vs concentración a 180 min de agitación con los dos ensayos.

El mejor resultado obtenido en la remoción de color fue en un tiempo de 135 min a una concentración de 20 g/L con un valor de 56.36% a partir de la absorbancia, teniendo en cuenta el diseño de experimentos se afirma que el tiempo afecta la remoción de color debido a que el carbón activado llega a un punto de saturación en el cual se puede generar el desprendimiento de partículas afectando la remoción de color.

3.4.5. Sólidos Suspendidos Totales

Los sólidos suspendidos totales (SST), son la cantidad de material particulado que se encuentra suspendido en las corrientes o fuentes de agua residual y/o superficial, el valor que indica este

ensayo es la cantidad de residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de 0.45 micras [62].

El agua cruda presentaba como solidos suspendidas, trazas del pigmento, se realizó el proceso como lo indica la norma y se obtuvo como resultado 0.631 mg/L lo cual es un resultado muy bajo comparando con el valor máximo permisible de 200 mg/L que indica la norma 0631. Lo cual indica que el agua cruda no posee una cantidad significativa de material particulado en suspensión.

3.5. Análisis de ensayos externos

Como se indicó anteriormente se envió una muestra del agua tratada a un laboratorio externo (Hidrolab) con el fin de analizar los parámetros de calidad del agua que se encuentran a continuación. Teniendo en cuenta que los valores obtenidos en el ANEXO 2 debían estar dentro de los rangos permitidos por la resolución 0631.

3.5.1. Color verdadero

El color está directamente relacionado con las partículas o sustancias en suspensión que contiene el agua, este parámetro indica el agua de consumo humano por medio del sistema organoléptico. Este parámetro se mide para conocer el nivel de materia orgánica que se encuentra presente en el agua, debido a que su presencia es un factor de riesgo ya que puede generar subproductos nocivos de la desinfección del agua [49].

Inicialmente el agua cruda contiene un valor de 80 Pt-Co mientras que el agua tratada 55 Pt-Co, lo cual indica que se removi6 un 31.25% del color verdadero siendo este el valor que depende solamente del agua y las sustancias disueltas en ella [49].

3.5.2. Remoci6n de hidrocarburos

Los hidrocarburos se consideran macromol6culas que afectan las caracteristicas organol6pticas del agua causando rechazo por parte de los consumidores, esta contaminaci6n ocurre con relativa frecuencia, afectando las fuentes de abastecimiento subterráneas y superficiales, el consumo de agua contaminada por hidrocarburos representa un riesgo para la salud, de igual forma, afecta el ecosistema por el impacto negativo sobre sus diferentes componentes [63].

Teniendo en cuenta la Resolución 0631 donde se indica que el valor máximo permisible de hidrocarburos totales es de 10 mg/L y el agua cruda presenta un valor total de 31.6 mg/L, el agua tiene un exceso de hidrocarburos 216% sobre el valor máximo permisible.

Posterior al tratamiento se obtuvo un dato de 0.5 mg/L hidrocarburos totales lo cual indica que el tratamiento removió el 98.42%. Los hidrocarburos al considerarse macro moléculas se esperaba una remoción menor a este porcentaje debido a que la mayor cantidad de poros del carbón activado son micro poros, aunque esta remoción se pudo deber a que la cantidad total de hidrocarburos no eran tal alta, la agitación y las concentraciones de carbón activado utilizadas en el tratamiento.

3.5.3. *Demanda Química de Oxígeno*

La demanda química de oxígeno se define como la cantidad de oxígeno disuelto consumido, bajo condiciones preestablecidas por la oxidación química de la materia orgánica biodegradable presente en el agua. Se utilizan distintos oxidantes, como el permanganato potásico o el dicromato potásico. Este parámetro permite medir la cantidad de compuestos orgánicos, sales oxidables (sulfuros), ya sean biodegradables o no [64].

A continuación, se presenta la tabla resumen de los valores obtenidos para la demanda química de oxígeno:

Tabla 19.
Resumen DQO

Ensayo	Agua cruda	Agua tratada	Porcentaje de remoción
DQO (mg/L)	778	490	37.018%

Nota. Tabla resumen resultados del ensayo de demanda química de oxígeno.

Siendo 778 el valor de DQO para el agua cruda, 490 para el agua tratada y un valor de remoción del 37.018%.

3.5.4. *Análisis estadístico*

Para evaluar el efecto combinado de las tres variables independientes (tiempo- velocidad de agitación y concentración) sobre el porcentaje de remoción de color y turbidez se realizaron 12

experimentos. La tabla 20 presenta la matriz completa del diseño experimental junto con los resultados obtenidos de la variable de respuesta.

Tabla 20.
Matriz del diseño de experimentos

CONCENTRACIÓN (g/l)						
TIEMPO (135Min)	20		25		30	
pH	8.3	8.26	8.3	7.32	8.27	8.22
%Remoción de color	56.36%	52.20%	54.28%	50.24%	49.02%	43.15%
%Remoción de turbidez	71.35%	62.71%	62.89%	50.31%	56.36%	56.36%
Conductividad	629	597	647	770	542	692
CONCENTRACIÓN (g/l)						
TIEMPO (180Min)	20		25		30	
pH	8.11	8.22	8.2	8.14	7.86	8.26
%Remoción de color	49.51%	47.68%	40.71%	44.50%	46.21%	44.74%
%Remoción de turbidez	56.49%	57.97%	56.80%	56.94%	59.80%	65.17%
Conductividad	857	805	769	809	890	815

Nota. Tabla resumen de resultados para variables de respuesta.

La metodología experimental consistió en adicionar una cantidad determinada de Carbón activado en un beaker de 1000 mL. Al finalizar cada experimento se procedió a filtrar la suspensión. El líquido filtrado fue analizado utilizando un espectrofotómetro Genesys 30® que entrega la gráfica de absorbancia vs longitud de onda, además de esto permite el movimiento de la gráfica para obtener el dato más alto de absorbancia. pH con un pH metro de la marca SI Analytics ® que permitió conocer para cada uno de los 12 ensayos su pH. Turbidez con un turbidímetro comercial con un rango de 0 NTU- 10.000 NTU siendo esta una de las variables claves para evaluar la viabilidad del tratamiento, de igual manera, la conductividad y otros parámetros que se evaluaron en un laboratorio externo (Hidrolab).

Tabla 21.
Análisis de varianza

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F(p)</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	0.00038578	1	0.00038578	0.1754183	0.68991996	5.98737760
Columnas	0.00581889	1	0.00581889	1.3229568	0.33421125	5.14325285
Interacción	0.01299215	2	0.006496077	2.9538372	0.12793014	5.14325285
Dentro del grupo	0.01319519	3	0.004398397	8		
Total	0.03239202	5	0.006478404			
		6	0.002199199			
		11				

Nota. Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de turbidez.

En la tabla 21 se presenta el análisis de varianza. En éste se observa cómo el valor $F(p)$ resulta menor que F , para los efectos principales: Tiempo acumulado (minutos), Concentración de adsorbente (gr/L) y sus interacciones, con lo cual se puede afirmar que estos efectos y sus interacciones no tienen diferencias significativamente estadísticas, es decir, el cambio en el tiempo acumulado y la cantidad de adsorbente (gr/L), son factores que no tienen influencia significativa en la respuesta del experimento.

Tabla 22.
Resumen de hipótesis.

Planteamiento de hipótesis (Ho=Nula/Ha=alternativa)		
Ho	Efecto de la concentración = 0	La cantidad de adsorbente no influye en la remoción
Ha	Efecto de la concentración $\neq 0$	
Ho	Efecto del tiempo = 0	El tiempo acumulado no influye en la remoción
Ha	Efecto del tiempo $\neq 0$	
Ho	Efecto de la concentración X el tiempo = 0	La interacción del tiempo y la cantidad de adsorbente no influye en la remoción
Ha	Efecto de la concentración X el tiempo $\neq 0$	

Nota. Hipótesis para el análisis de varianza del diseño de experimentos.

Como las interacciones no son significativas las hipótesis nulas se aceptan y se pueden evaluar los efectos principales por separado. Por lo tanto, se graficó la variación de pH, conductividad, el porcentaje de remoción de turbidez, color y se presenta el análisis de las interacciones para cada variable respuesta.

Tabla 23.
Análisis de varianza

Nota. Análisis de varianza para el porcentaje de remoción del color.

ANALISIS DE VARIANZA (% remoción de color)						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F(p)</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Muestra	0.00848385	1	0.00848385	11.5871746	0.01442483	5.98737760
	4		4	9	2	7
Columnas	0.00676282	2	0.00338141	4.61830243	0.06106454	5.14325285
	2		1	2	6	
Interacción	0.00411209	2	0.00205604	2.80813063	0.13780171	5.14325285
	3		6	4	9	
Dentro del grupo	0.00439305	6	0.00073217			
	7		6			
Total	0.02375182	11				
	6					

Nota. Análisis de varianza para el porcentaje de remoción de color.

Sin embargo, para el análisis estadístico (ANOVA) En la tabla 23 se observa cómo el valor F(p) resulta mayor que F, para los efectos principales del Tiempo acumulado (minutos) y menores para la concentración de adsorbente (gr/L) y sus interacciones, con lo cual se puede afirmar que el efecto en el cambio del tiempo acumulado presenta diferencias significativamente estadísticas, es decir, el tiempo es una variable que influye en el porcentaje de remoción de color. Sin embargo, la concentración y sus interacciones con el tiempo no tienen diferencias significativamente estadísticas en la respuesta del experimento.

Haciendo referencia a los resultados obtenidos experimentalmente en el laboratorio de la Fundación Universidad de América e Hidrolab, este carbón abarca ciertos beneficios en cuanto a determinados contaminantes. Por lo cual, siendo los hidrocarburos, el color y la demanda química de oxígeno parámetros con alta remoción, existe una alta viabilidad de uso de este carbón activado para el tratamiento de aguas en las industrias petroquímicas, textil y agroalimenticia ya sea a nivel laboratorio o a una mayor escala donde otro parámetro de gran importancia será la viabilidad económica determinando si las cantidades requeridas y su costo beneficio cumplen con el objetivo.

4. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica realizada en plataformas como Scopus y Sciencedirect, se determinaron los requerimientos técnicos que presenta la alternativa de tratamiento de aguas con carbón activado como adsorbente, estableciendo así dos parámetros principales influyentes en el desarrollo del tratamiento; la adsorción del carbón activado y la calidad del agua. Los parámetros que intervienen en la capacidad de adsorción del carbón son principalmente el área superficial, las dimensiones de los poros, tiempo de contacto, temperatura y concentración. Por otro lado, para el análisis de calidad del agua fue necesario determinar parámetros como turbidez, pH, conductividad, hidrocarburos totales, color verdadero, sólidos suspendidos totales con valores iniciales de 22.34 NTU, 7.14, 704 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 31.6 mgHC/L, 80 Pt - Co, 0.631 mgSST/L respectivamente y de esta manera evaluar su remoción de contaminantes.

Se determinó la capacidad adsorptiva del carbón activado a partir de las pruebas de caracterización indicadas en la NTC 4467, obteniendo como resultado un carbón con baja capacidad de adsorción, dado que se obtiene un área superficial de 130.878 m^2/g , lo que hace al tiempo de contacto y concentración, factores de mayor importancia para una mejor capacidad de adsorción.

Se determinó a través de las isothermas de adsorción el área superficial del carbón activado con un valor de 130.878 m^2/g , siendo esta un área por debajo del promedio comparada con otros carbones activados y rica en micro poros ocupando un 69.64% del área, dificultando la adsorción de macro y meso moléculas como se pudo evidenciar en los ensayos de adsorción.

Las dos variables bajo estudio (concentración y tiempo) en el análisis de varianza no tienen un efecto significativo sobre el porcentaje de remoción de turbidez en el agua tratada, sin embargo, para el porcentaje de remoción de color el tiempo tiene influencia significativa según el ANOVA, no obstante, teniendo en cuenta los resultados de remoción experimentales el carbón activado a través del tiempo puede llegar a un punto de saturación en el cual la adsorción de contaminantes se detiene.

Finalizado el tratamiento se analizaron las variables de calidad del agua para determinar los resultados de remoción de contaminantes y definir cuantitativamente su desempeño. Se evaluó técnicamente la viabilidad del uso del carbón activado proveniente de la especie *Chusquea Scandens Kunth* como adsorbente en un tratamiento de aguas, teniendo en cuenta los resultados de

remoción de contaminantes obtenidos: turbidez 71.36%, DQO 37.02%, color verdadero 31.24%, hidrocarburos totales 98.42%, conductividad 10.7%, absorbancia 56.36%, SST 100% resumidos en tabla 18. Se estableció que terminado el tratamiento estos parámetros en su totalidad se encuentran en los rangos permisibles de la Resolución 0631 del 2015 encontrada en el ANEXO 3 por lo que se concluye que técnicamente el uso del carbón activado como adsorbente de contaminantes en el tratamiento de aguas si es viable.

BIBLIOGRAFIA

- [1] X. Zambrano, x. Saltos, and f. Villamar, “diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población san eloy en la provincia de manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre.”
- [2] “Día mundial del agua: cómo afectan las aguas residuales.” <https://www.accioncontraelhambre.org/es/te-contamos/actualidad/dia-mundial-del-agua-como-afectan-las-aguas-residuales-los-refugiados> (accessed jun. 24, 2021).
- [3] “El carbón activado en tratamiento de aguas | cropaia.” <https://cropaia.com/es/blog/carbon-activado-en-tratamiento-de-aguas/> (accessed mar. 20, 2021).
- [4] C. Santiago and c. Pita, “evaluación de la obtención de carbón activado utilizando bambú de la especie chusquea scandens kunth por activación física.”
- [5] Fondef, “fondo de fomento al desarrollo científico y tecnológico fondef de conicyt programa fondef regional.”
- [6] P. N. Ramírez-narvárez and p. Velasco-linares, “características de la floración en poblaciones de chusquea scandens kunth-bogotá, d.c. (colombia),” *caldasias*, vol. 38, no. 1, pp. 137–147, jan. 2016, doi: 10.15446/caldasias.v38n1.57834.
- [7] U. Sevilla, “manual del carbón activo,” *aula.aguapedia.org*, pp. 1–89, 2011, [online]. Available: http://aula.aguapedia.org/pluginfile.php/10339/mod_resource/content/1/carbon_activo_definitivo_tar.pdf.
- [8] H. J. Yang, y. J. Cha, h. Kim, and s. S. Choi, “antifungal activity of nano and micro charcoal particle polymers against paecilomyces variotii, trichoderma virens and chaetomium globosum,” *n. Biotechnol.*, vol. 33, no. 1, pp. 55–60, jan. 2016, doi: 10.1016/j.nbt.2015.08.001.
- [9] “Carbón activado - wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/carbón_activado (accessed mar. 18, 2021).
- [10] A. L. G. M.-w. R. Arrieta, “obtencion de carbon activado apartir de activación química de

- pulpa de café y su aplicación en la remoción de colorantes en aguas residuales industriales,” 2016.
- [11] A. L. G. M.-w. R. Arrieta, “obtencion de carbon activado a partir de activación química presentado por: angela lorena grisales motato-wilmer rojas arrieta universidad tecnologia de pereira programa de tecnologia química facultad de tecnología pereira 2016obtencion de carbon activado.”
- [12] F. Casas méndez, “aplicación de tratamientos físicos y de oxidación química a la eliminación de contaminantes emergentes en diferentes matrices acuosas,” 2017, accessed: mar. 18, 2021. [online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=71903&info=resumen&idioma=eng>.
- [13] “¿Cuál es la diferencia entre absorción y adsorción? - carbotecnia.” <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/tratamiento-de-agua/diferencia-entre-absorcion-y-adsorcion/> (accessed jun. 17, 2021).
- [14] Cristian camilo ramos velandia, “evaluacion de un sistema de tratamiento de lodos activados para la remocion de carga organica en las aguas residuales domesticas generadas en el colegio san viator.” [Http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6578/1/6121887-2017-2-iq.pdf](http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6578/1/6121887-2017-2-iq.pdf) (accessed may 20, 2021).
- [15] “Pretratamiento - wikipedia, la enciclopedia libre.” <https://es.wikipedia.org/wiki/pretratamiento> (accessed may 20, 2021).
- [16] “Pretratamiento - wikipedia, la enciclopedia libre.” <https://es.wikipedia.org/wiki/pretratamiento> (accessed mar. 20, 2021).
- [17] Carbotecnia, “el carbón activado en el tratamiento de aguas residuales.” <https://www.carbotecnia.info/pdf/boletines/ar-001.pdf> (accessed mar. 20, 2021).
- [18] Margarita maria forigua medina, “desarrollo de una propuesta de mejoramiento para el tratamiento de aguas residuales de la planta de nitrato de amonio en fertilizantes colombianos fertilcol s.a.” <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/491/1/6101427-2016-2-iq.pdf>

- (accessed may 20, 2021).
- [19] Minambiente, “resolución 0631 del 2015.” Pp. 305–327, 2015, doi: 10.4324/9780203861950.
- [20] H. E. Fernández, “pigmentos organicos e inorganicos utilizados en las industrias de pinturas o recubrimientos y del plastico,” 2008.
- [21] “High-performance organic pigments for fascinating colors.”
- [22] “Pigmentos inorgánicos.” <https://www.heubachcolor.com/es/productos/pigmentos-inorganicos-heubach-gmbh/> (accessed jun. 19, 2021).
- [23] Y. Anjaneyulu, n. Sreedhara chary, and d. Samuel suman raj, “decolourization of industrial effluents - available methods and emerging technologies - a review,” *rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 4, no. 4, pp. 245–273, 2005, doi: 10.1007/s11157-005-1246-z.
- [24] “La fabricación de ropa genera el 20% de las aguas residuales del mundo.” <https://expansion.mx/vida-arte/2019/06/26/la-fabricacion-de-ropa-genera-el-20-de-las-aguas-residuales-del-mundo> (accessed jun. 19, 2021).
- [25] Astm, “standard test method for determination of iodine number of activated carbon .”
- [26] Norma tecnica colombiana, “ntc 4467,” *ntc 4467*, 1998.
- [27] Esther gutiérrez callejo, “tratamientos ácidos de materiales nanoporosos silícicos. Estudíe las modificaciones texturales .”
- [28] G. E. Sanchez, “plataforma de sensores móviles, para medir la contaminación en un entorno urbano. Universidad politécnica de cataluña,” pp. 1–50, 2016.
- [29] “Ceniza - ecured.” <http://www.ecured.cu/ceniza> (accessed jul. 28, 2021).
- [30] D. C. Montgomery and j. Wiley, “sixth edition i ntroduction to statistical quality control.”
- [31] I. Dobrosz-gómez, m.-á. Gómez, and c. Santa, “optimización del proceso de adsorción de cr(vi) sobre carbón activado de origen bituminoso,” *inf. Tecnológica*, vol. 29, no. 6, pp. 43–56, 2018, doi: 10.4067/s0718-07642018000600043.

- [32] “¿Qué es la conductividad eléctrica/salinidad?”
- [33] Banco interamericano de desarrollo - andi, “manual de caracterizacion de aguas residuales industriales.” [https://www.acodal.org.co/holland/memorias/taller_vertimientos/manual de caracterizacion de aguas residuales industriales.pdf](https://www.acodal.org.co/holland/memorias/taller_vertimientos/manual_de_caracterizacion_de_aguas_residuales_industriales.pdf) (accessed may 20, 2021).
- [34] “Medida del ph.” <http://www.ehu.eus/biomoleculas/ph/medida.htm> (accessed jun. 19, 2021).
- [35] “Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales.”
- [36] “Propiedades del carbón activo | desotec.” <https://www.desotec.com/es/soluciones/carbon-activo> (accessed jun. 17, 2021).
- [37] Institucional, “capitulo i. El carbón activado y sus propiedades.”
- [38] Mercedes alicia carrillo solano, “estudio de la adsorción de iones cadmio cd^{2+} y zinc zn^{2+} sobre un carbón activado comercial sin control de ph.” <https://1library.co/document/qvvor7gq-estudio-adsorcion-iones-cadmio-carbon-activado-comercial-control.html> (accessed mar. 18, 2021).
- [39] F. Javier soto paredes, “universidad de chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería industrial evaluación técnico económica de una planta de carbón activado memoria para optar al título de ingeniero civil industrial.”
- [40] M. M.-t. Lastnamejulio alberto solís-fuentes, “obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña.” <https://www.redalyc.org/pdf/482/48224413006.pdf> (accessed jun. 09, 2021).
- [41] H. A. Rojas, d. C. Guerrero, o. Y. Vásquez, and j. S. Valencia, “aplicación del modelo de bohart y adams en la remoción de mercurio de drenajes de minería por adsorción con carbón activado,” vol. 23, no. 3, pp. 21–32, 2011, doi: 10.4067/s0718-07642012000300004.
- [42] L. Giraldo profesora asistente, v. García, and j. Carlos moreno, “caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados superficial characterization in gas and liquid phase of activated carbons.”
- [43] M. B. Aldás sandoval, “incineración de la fracción biodegradable de los residuos sólidos

- urbanos,” *cumbres*, vol. 2, no. 2, pp. 9–15, 2017, doi: 10.48190/cumbres.v2n2a1.
- [44] “Adsorción-carbon-activo.” <https://www.lenntech.es/adsorcion-carbon-activado.htm> (accessed jun. 11, 2021).
- [45] S. D. Faust and o. M. Aly, “batch systems and fixed and fluidized beds,” *adsorpt. Process. Water treat.*, no. 325, pp. 123–165, 1987, doi: 10.1016/b978-0-409-90000-2.50007-8.
- [46] “Ficha técnica laca nitrocelulósica multitonos.”
- [47] “Análisis de calidad del agua (turbiedad y color) de un sistema de filtración de flujo ascendente construido con materiales granulares para bajantes de agua lluvia.”
- [48] “Turbidez: importancia del parámetro y como es la técnica instrumental relacionada.” <https://www.aguasresiduales.info/revista/blog/turbidez-importancia-del-parametro-y-como-es-la-tecnica-instrumental-relacionada> (accessed jun. 09, 2021).
- [49] “Color del agua, parámetro indicador de calidad.” <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/color-del-agua-parametro-indicador-de-calidad> (accessed jun. 09, 2021).
- [50] E. Pérez-lópez, “quality control of water for human consumption in the region of the west in costa rica,” *tecnol. En marcha*, vol. 29, pp. 3–14, doi: 10.18845/tm.v29i3.2884.
- [51] Y. Solís-castro, I. Alberto zúñiga-zúñiga, d. Mora-alvarado, and d. La, “la conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en pozos y nacientes de costa rica conductivity as a predictive parameter of hardness in groundwater and spring water of costa rica,” *tecnol. En marcha*, vol. 31, no. 1, pp. 35–46, 2018, doi: 10.18845/tm.v31i1.3495.
- [52] C. Feijoo, e. De la torre, and r. Uribe, “determinación de la capacidad de adsorción del complejo oro-cianuro en compósitos de carbón activado-vidrio,” *rev. Afinidad*, vol. 588, no. December, pp. 299–306, 2019.
- [53] Blanca steffanía carrasco tito and erika gabriela londa veletanga, “obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco ‘cocos nucifera l.’” [https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31705/1/trabajo de titulación.pdf](https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31705/1/trabajo_de_titulacion.pdf) (accessed jun. 10, 2021).
- [54] D. Trotsek, “remoción de azul de metileno de cuerpos de agua utilizando nanopartículas

- magnéticas Fe_3O_4 y carbón activado,” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 110, no. 9, pp. 1689–1699, 2017.
- [55] M. Hernández, A. Otero, J. Falcón, and Y. Yperman III, “características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco modificado con HNO_3 ,” 2017. Accessed: jun. 11, 2021. [online]. Available: <http://ojs.uo.edu.cu/index.php/cq>.
- [56] “Capítulo 10.” [Http://www.fao.org/3/x5328s/x5328s11.htm](http://www.fao.org/3/x5328s/x5328s11.htm) (accessed jun. 11, 2021).
- [57] José rincón, sonia rincón, pedro guevara, daniel ballén, juan camilo morales, and néstor monroy, “producción de carbón activado mediante métodos físicos a partir de carbón de el cerrejón y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales provenientes de tintorerías.” [Http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v39n151/v39n151a04.pdf](http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v39n151/v39n151a04.pdf) (accessed jun. 17, 2021).
- [58] “¿Qué es el carbón activado? ¿para qué sirve? - carbotecnia.” [Https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/](https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/carbon-activado/que-es-carbon-activado/) (accessed jun. 14, 2021).
- [59] E. Pérez-lópez, “control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de costa rica,” *rev. Tecnol. En marcha*, vol. 29, no. 3, p. 3, nov. 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2884.
- [60] L. Quintero and S. Cardona Gallo, “evaluación del tratamiento biológico para remoción de color índigo de agua residual industrial textil por un consorcio microbiano en lecho fluidizado,” *gestión y ambient.*, vol. 14, no. 2, pp. 105–113, 2011.
- [61] M. G. Raigoza, J. David, and M. Arroyave, “remoción de colorantes de aguas residuales resultantes del tinturado de flores,” 2017.
- [62] “Ficha técnica sistema de información del medio ambiente identificación de la variable descripción general,” 2003. Accessed: jun. 16, 2021. [online]. Available: <http://institucional.ideam.gov.co/descargas?com=institucional&name=pubfile814&downloadname=>.
- [63] Vicente I. Prieto Díaz and Agustín Martínez de Villa Pérez, “la contaminación de las aguas por hidrocarburos: un enfoque para abordar su estudio.”

[Http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v37n1/hie03199.pdf](http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v37n1/hie03199.pdf) (accessed jun. 16, 2021).

[64] “Calidad del agua.”

[Http://www.cma.gva.es/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_d_el_agua/cicag/2/2_5_1/main.html](http://www.cma.gva.es/areas/educacion/educacion_ambiental/educ/publicaciones/ciclo_d_el_agua/cicag/2/2_5_1/main.html) (accessed jun. 16, 2021).

ANEXOS

ANEXO 1

FACTOR DE CORRECCIÓN DE YODO PARA PRUEBA DE ÍNDICE DE YODO EN CARBONES ACTIVADOS SEGÚN NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4467.

Productos químicos industriales. Carbón activado. Métodos de ensayo.

Normali- dad filtrado residual	0,0000	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009
0,008	1,1625	1,1613	1,1600	1,1575	1,1550	1,1533	1,1513	1,1500	1,1475	1,1463
0,009	1,1438	1,1425	1,1400	1,1375	1,1363	1,1350	1,1325	1,1300	1,1288	1,1275
0,010	1,1250	1,1238	1,1225	1,1213	1,1200	1,1175	1,1163	1,1150	1,1138	1,1113
0,011	1,1100	1,1088	1,1075	1,1063	1,1038	1,1025	1,1000	1,0988	1,0975	1,0963
0,012	1,0950	1,0938	1,0925	1,0900	1,0888	1,0875	1,0863	1,0850	1,0838	1,0825
0,013	1,0800	1,0788	1,0775	1,0763	1,0750	1,0738	1,0725	1,0713	1,0700	1,0688
0,014	1,0675	1,0663	1,0650	1,0625	1,0613	1,0600	1,0588	1,0575	1,0563	1,0550
0,015	1,0538	1,0525	1,0513	1,0500	1,0488	1,0475	1,0403	1,0450	1,0436	1,0425
0,016	1,0413	1,0400	1,0399	1,0375	1,0375	1,0363	1,0350	1,0333	1,0325	1,0313
0,017	1,0300	1,0288	1,0275	1,0263	1,0250	1,0245	1,0238	1,0225	1,0208	1,0200
0,018	1,0200	1,0188	1,0175	1,0163	1,0150	1,0144	1,0138	1,0125	1,0125	1,0113
0,019	1,0100	1,0088	1,0075	1,0075	1,0063	1,0050	1,0050	1,0038	1,0025	1,0025
0,020	1,0013	1,0000	1,0000	0,9988	0,9975	0,9975	0,9963	0,9950	0,9950	0,9938
0,021	0,9938	0,9925	0,9925	0,9913	0,9900	0,9900	0,9888	0,9875	0,9875	0,9863
0,022	0,9863	0,9850	0,9850	0,9838	0,9825	0,9825	0,9813	0,9813	0,9800	0,9766
0,023	0,9766	0,9775	0,9775	0,9763	0,9763	0,9763	0,9750	0,9736	0,9736	0,9725
0,024	0,9725	0,9708	0,9700	0,9700	0,9688	0,9688	0,9675	0,9675	0,9663	0,9663
0,025	0,9650	0,9650	0,9638	0,9638	0,9625	0,9625	0,9613	0,9613	0,9606	0,9600
0,026	0,9600	0,9588	0,9588	0,9575	0,9575	0,9563	0,9563	0,9550	0,9550	0,9538
0,027	0,9538	0,9525	0,9525	0,9519	0,9513	0,9513	0,9506	0,9500	0,9500	0,9488
0,028	0,9488	0,9475	0,9475	0,9463	0,9463	0,9463	0,9450	0,9450	0,9438	0,9438
0,029	0,9425	0,9425	0,9425	0,9413	0,9413	0,9400	0,9400	0,9394	0,9388	0,9388
0,030	0,9375	0,9375	0,9375	0,9363	0,9363	0,9363	0,9363	0,9350	0,9350	0,9346
0,031	0,9333	0,9333	0,9325	0,9325	0,9325	0,9319	0,9313	0,9313	0,9300	0,9300
0,032	0,9300	0,9294	0,9288	0,9288	0,9280	0,9275	0,9275	0,9275	0,9270	0,9270
0,033	0,9263	0,9263	0,9257	0,9250	0,9250	-	-	-	-	-

ANEXO 2

RESULTADOS EXPERIMENTALES HIDROLAB PRE Y POST TRATAMIENTO

Informe N°: 202105001669



* 2 0 2 1 0 5 0 0 1 6 6 9 1 6 0 6 1 2 *

Informe de Ensayo (SN)

Numero de Ingreso 26112-01

Cliente: IVAN DARIO CASAS CONTRERAS

Dirección: Calle 82N° 112f - 10, int apt 301 - Bogota

Proyecto: Control Muestras de Aguas de Varios Tipos

Identificación Cliente: NICOLAS VEJARANO LEAL

Lugar de Muestreo: Fundacion Universidad America

Dirección: Calle 82 N° 112F - 10

Ciudad / Región: BOGOTÁ, Bogotá D.C

Instrumento Ambiental:

Punto de Muestreo: Etrada Tratamiento de Agua

Matriz: Aguas residuales

Término de Muestreo: 11/05/2021 08:00:00

Muestreado por: Cliente

Tipo de Muestreo: Puntual

Recepción Laboratorio: 12/05/2021 09:16:00

Parámetro	Unidades	Resultados	Fecha y Hora Análisis	Ref.Método
pH	unidad	6,81(18,6°C)	12/05/2021 16:07:4	SM 4500-H B (2)
DQO	mg/L	772	12/05/2021 10:11:3	SM 5220 D (2)
Hidrocarburos totales	mg/L	31,6	14/05/2021 12:04:5	SM 5520 C,F (2)
Color verdadero	Pt-Co	80	12/05/2021 10:56:2	SM 2120 C (2)
Conductividad	us/cm	778	12/05/2021 11:07:4	SM 2510 B (2)

Notas:

(2) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition 2017.

Varcelis Vargas
Directora Operativa

(SN)



* 2 6 1 1 2 2 5 5 V V 1 6 0 6 1 1 *

Fecha Emisión Informe: 25 de mayo de 2021

Resultados válidos únicamente para la muestra analizada.
Prohibida toda reproducción parcial o total de este informe sin autorización del laboratorio.

Autopista Medellín Km 2.5, vía parcelas de Cota Km 1.3 Conjunto de Bodegas AEPI, Bodega N° 3A - Teléfono +57 (1) 5 19 03 85

26112-01 1 / 1

Informe N°: 202105001670



* 2 0 2 1 0 5 0 0 1 6 7 0 1 6 0 6 1 3 *

Informe de Ensayo (SN)

Numero de Ingreso 26112-02

Cliente: IVAN DARIO CASAS CONTRERAS

Dirección: Calle 82N° 112f - 10, int apt 301 - Bogota

Proyecto: Control Muestras de Aguas de Varios Tipos

Identificación Cliente: NICOLAS VEJARANO LEAL

Lugar de Muestreo: Fundacion Universidad America

Dirección: Calle 82 N° 112F - 10

Ciudad / Región: BOGOTÁ, Bogotá D.C

Instrumento Ambiental:

Punto de Muestreo: Salida Tratamiento Aguas

Matriz: Aguas residuales

Término de Muestreo: 11/05/2021 17:00:00

Muestreado por: Cliente

Tipo de Muestreo: Puntual

Recepción Laboratorio: 12/05/2021 09:16:00

Parámetro	Unidades	Resultados	Fecha y Hora Análisis	Ref.Método
pH	unidad	0,90(18,6°C)	12/05/2021 16:07:4	SM 4500-H B (2)
DQO	mg/L	490	12/05/2021 10:11:3	SM 5220 D (2)
Hidrocarburos totales	mg/L	<0,50	14/05/2021 12:04:5	SM 5520 C,F (2)
Color verdadero	Pt-Co	55	12/05/2021 10:56:2	SM 2120 C (2)
Conductividad	us/cm	31000	12/05/2021 11:07:4	SM 2510 B (2)

Notas:

(2) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23th Edition 2017.

Varcelis Vargas
Directora Operativa

(SN)



* 2 6 1 1 2 2 5 5 V V 1 6 0 6 1 1 *

Fecha Emisión Informe: 25 de mayo de 2021

Resultados válidos únicamente para la muestra analizada.
Prohibida toda reproducción parcial o total de este informe sin autorización del laboratorio.

Autopista Medellín Km 2.5, vía parcelas de Cota Km 1.3 Conjunto de Bodegas AEPI, Bodega N° 3A - Teléfono +57 (1) 5 19 03 85

26112-02 1 / 1

ANEXO 3

TABLA PARAMETROS PERMISIBLES 0631

PARÁMETRO	UNIDADES	FABRICACIÓN DE SUSTANCIAS Y PRODUCTOS QUÍMICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS- DE CROMATOS Y MOLIBDATOS DE PLOMO
			DE AZUL ULTRAMAR	DE ÓXIDOS DE HIERRO	
Generales					
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	800,00	500,00	500,00	200,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	600,00	200,00	200,00	150,00
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	mg/L	200,00	200,00	200,00	150,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	5,00	5,00	5,00	5,00
Grasas y Aceites	mg/L	25,00	25,00	25,00	25,00
Fenoles	mg/L	0,20			
Formaldehído	mg/L	Análisis y Reporte			
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte			
Hidrocarburos					
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10,00			
Compuestos de Fósforo					
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte			
Compuestos de Nitrógeno					
Nitratos (N-NO ₃)	mg/L				Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L				Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte			Análisis y Reporte
Iones					
Cianuro Total (CN ⁻)	mg/L	0,50			
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	400,00	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	1,00			
Metales y Metaloides					
Arsénico (As)	mg/L	0,10			

PARÁMETRO	UNIDADES	FABRICACIÓN DE SUSTANCIAS Y PRODUCTOS QUÍMICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS- DE CROMATOS Y MOLIBDATOS DE PLOMO
			DE AZUL ULTRAMAR	DE ÓXIDOS DE HIERRO	
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05			
Cinc (Zn)	mg/L	3,00		3,00	3,00
Cobalto (Co)	mg/L	Análisis y Reporte			
Cobre (Cu)	mg/L	1,00			
Cromo (Cr)	mg/L	0,50			0,50
Hierro (Fe)	mg/L			5,00	
Mercurio (Hg)	mg/L	0,01			
Níquel (Ni)	mg/L	0,50			
Plomo (Pb)	mg/L	0,20			0,50
Selenio (Se)	mg/L	0,20			
Otros Parámetros para Análisis y Reporte					
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

ANEXO 4

RECOMENDACIONES.

Se recomienda utilizar el carbón activado como adsorbente de otros contaminantes específicos para evaluar la remoción de los mismos, de esta manera conocer que contaminantes presentan mayor afinidad de adsorción con el carbón activado.

Se recomienda realizar un aumento del número de tiempos dentro del rango utilizado en este proyecto como variable en el diseño de experimentos, para determinar el momento de saturación del carbón activado.

Se recomienda utilizar un carbón activado químicamente de la especie *Chusquea Scandens Kunth*, para evaluar su capacidad de adsorción de otros contaminantes en el tratamiento de aguas.

Se recomienda realizar un tratamiento de aguas por columna de lecho fijo utilizando el carbón activado de la especie *Chusquea Scandens Kunth*, para determinar qué tipo de tratamiento es más eficiente.