



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**REMOCIÓN DE COLORANTES EN AGUA RESIDUAL MEDIANTE
ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DE RESIDUOS
ORGÁNICOS**

TESIS

**PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA

ESMERALDA ABIGAIL GUTIÉRREZ MORALES

DIRECTORA DE TESIS

Dra. GABRIELA PÉREZ OSORIO

CO-DIRECTOR DE TESIS

Dr. JOSÉ ELIGIO MOISÉS GUTIÉRREZ ARIAS

JURADO ASIGNADO

Dra. FABIOLA AVELINO FLORES

M.I.A MAYTÉ JUÁREZ MENESES

PUEBLA, PUE. FEBRERO 2022

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme la dicha de seguir viva, darme a la familia más bonita y unida que puede existir, por esos amigos extraordinarios, por guiarme a trazar mi camino y cuidarme de los momentos más peligrosos.

A mi familia

Agradezco a mis padres Maricela y Miguel, ellos siempre fueron y son mi más grande apoyo para poder culminar esta etapa de mi vida, a mi hermano Brian por su eterna paciencia y siempre sacarme una sonrisa cuando más estaba estresada sin siquiera saberlo, mis tíos por ser mi ejemplo a seguir, pero en especial a mi tío Galo, gracias infinitas por ayudarme a estudiar, por enseñarme, por ser mi confidente, amigo, la persona con la que cuento en todo momento y siempre me hace sentir bien, eres como mi segundo papá y siempre te estaré agradecida. A mi mamá Susana, ella fue la persona que me crío y me enseñó a valorar todo lo que tengo y aprender de cada día, esta etapa que termino, se la dedico con mucho amor a usted, hasta donde se encuentre.

A mis amigos y compañeros

A mis compañeros, por tan bonitos momentos, esa palapa llena de alegría, apoyo en época de exámenes, risas que se escuchaban hasta el FIQ7, no olvidaré a los que siempre estuvieron para motivarme a seguir, pero también con los que siempre me iba a Costera o al dichoso FIQ10. Y quiero mencionar en especial a mis amigos incondicionales, siempre sacando lo mejor de uno; a Yarizeth Segura por siempre confiar en mí, Eduwin Hernández por ser el mejor amigo y nunca dejarme sola, a Carlos Morales por cuidar de mí siempre, Mario de la Vega por escucharme y nunca juzgar mis decisiones e Israel Fernández porque siempre está en cualquier momento, los quiero mucho.

A mis profesores

Principalmente a la Dra. Gabriela Pérez Osorio, por todas sus enseñanzas durante mi formación académica, desde que tomé la primera clase con ella supe que tenía que hacer mi tesis bajo su supervisión, gracias por guiarme, motivarme, y sobre todo darme un ejemplo de lo que algún día quiero ser, siempre será mi doctora favorita. Pero también a esos profesores que durante estos años me enseñaron y motivaron a no abandonar este sueño, gracias por ser estrictos, pero también amables y dispuestos a compartir todos sus conocimientos.

A la BUAP

Por darme la oportunidad de formarme en esta gran institución llena de prestigio y con muy buenos catedráticos.

RESUMEN

La contaminación por aguas residuales es un problema que aumenta día a día, en el presente trabajo se analiza la remoción de colorantes en aguas residuales textiles mediante adsorción con carbón activado obtenido de residuos orgánicos.

La metodología que se utiliza se divide en tres etapas: la primera etapa es la preparación del carbón activado mediante una activación química con ácido fosfórico a una concentración de 2% y una activación física o térmica en una mufla a 500°C durante una hora, mientras que la segunda etapa se pone a prueba el carbón activado obtenido de las cáscaras de naranja y mandarina para la adsorción del color en el agua residual textil, esto durante dos ciclos respectivamente, y finalmente en la última etapa se caracteriza el carbón activado inicial, el ciclo uno y dos por espectroscopia infrarroja.

El carbón activado se elaboró de una manera satisfactoria, se obtuvieron más de 3g CA de los 25g de cáscara seca que se tenían respectivamente y la concentración de ácido fosfórico fue el adecuado para tener una carbonización ideal, con respecto a la adsorción el carbón de cáscara de naranja fue el que tuvo una mejor capacidad de adsorción ya que removió el color durante los dos ciclos que se pusieron a prueba y fue en un menor tiempo, sin embargo, el carbón activado de cáscara de mandarina, si removió el color durante el primer ciclo, pero en el segundo ya no lo hizo al cien por ciento. Y finalmente en la caracterización del carbón activado los picos de absorción más representativos estuvieron presentes en la zona aproximada de los 2300 cm^{-1} que son nitrilos $-\text{C} \equiv \text{N}$, y en específico en el número de onda 1584 cm^{-1} son vibraciones de tensión $-\text{N} = \text{N}-$, compuestos azo, estos están presentes en aguas residuales textiles.

Finalmente se concluye que el carbón activado a partir de residuos orgánicos como la cáscara de naranja y mandarina adsorben colorantes en aguas residuales textiles, además que en el presente trabajo se muestran resultados por primera vez del carbón activado de cáscara de mandarina, y aunque no tuvo la misma capacidad de adsorción que el de naranja, se puede utilizar para adsorber los colorantes de aguas residuales y se puede seguir estudiando para tener mejores resultados.

Contenido

INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	2
Hipótesis.....	3
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 Contaminación del agua.....	4
1.1.1 Contaminación por colorantes	5
1.2 Tratamiento de aguas residuales.....	10
1.2.1 Tratamiento de aguas residuales convencionales	11
1.2.2 Procesos alternativos	14
1.3 Adsorción	15
1.3.1 Generalidades de la adsorción	15
1.3.2 Mecanismo de adsorción	16
1.3.3 Factores que influyen en el proceso de adsorción.....	17
1.3.4 Cinética y equilibrio de adsorción	19
1.4 Carbón activado.....	21
1.4.1 Origen del carbón activado	21
1.4.2 Características de carbón activado	22
1.4.3 Clasificación del carbón activado	23
1.4.4 Materia prima.....	27
1.4.4.1 Cáscara de naranja y mandarina.....	27
1.4.4.2 Economía Circular	30
1.4.5 Aplicación del carbón activado en adsorción.....	31
1.4.5.1 Activación térmica (física):	31
1.4.5.2 Activación química:	32
1.4.6 Aplicaciones de la adsorción por carbón activado	33
1.4.7 Regeneración.....	33
CAPÍTULO II METODOLOGÍA	35
2.1 Preparación del carbón activado	35

2.2	Pruebas de adsorción de contaminantes	36
2.3	Caracterización del carbón por espectroscopia infrarroja.....	36
CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN		37
3.1	Descripción del carbón activado	37
3.2	Capacidad de adsorción de los colorantes.....	39
3.3	Identificación de grupos funcionales.....	42
CONCLUSIONES		55
REFERENCIAS		56
Apéndice 1 IR: Absorciones infrarrojas características de los grupos funcionales.....		63
Anexo.....		66

Índice de Figuras

Figura 1 Estructuras químicas con representación de grupos cromóforos y auxocromóforos	5
Figura 2 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales en México.....	13
Figura 3 Métodos principales para la remoción de colorantes	15
Figura 4 Mecanismos de adsorción propuestos por Weber y Smith, 1987 ..	17
Figura 5 Representación esquemática de la estructura porosa del carbón activado.....	23
Figura 6 Diferentes formas del carbón activado	26
Figura 7 Estructura de la naranja y mandarina	28
Figura 8 Cáscara de naranja inicial y el carbón activado CAN.....	38
Figura 9 Cáscara de mandarina y su carbón activado CAM.....	39
Figura 10 Comparación del agua residual en el primer ciclo en contacto con el carbón activado de cáscara de naranja.....	40
Figura 11 Segundo ciclo del carbón activado de cáscara de naranja con el agua residual textil.....	40
Figura 12 Pruebas de adsorción del carbón activado de cáscara de mandarina con el agua residual textil ciclo 1	41
Figura 13 Segundo ciclo del carbón activado de cáscara de mandarina con el agua residual textil	41

Índice de Tablas

Tabla 1 Clasificación de los colorantes de acuerdo con su grupo cromóforo	7
Tabla 2 Clasificación de los colorantes de acuerdo con su aplicación.....	8
Tabla 3 Composición fisicoquímica aproximada de la cáscara de naranja y mandarina	29
Tabla 4 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado inicial de cáscara de naranja	44
Tabla 5 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de naranja después del primer ciclo.....	45
Tabla 6 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de naranja después del segundo ciclo	46
Tabla 7 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de mandarina inicial	48

Tabla 8 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de mandarina después del primer ciclo	49
Tabla 9 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de mandarina después del segundo ciclo.....	50
Tabla 10 Resumen de resultados obtenidos	54

Índice de Gráficas

Gráfica 1 Espectro de IR del carbón activado inicial de la cáscara de naranja	43
Gráfica 2 Espectro de IR del carbón activado del ciclo 1 de la cáscara de naranja	44
Gráfica 3 Espectro de IR del carbón activado del ciclo 2 de la cáscara de naranja	45
Gráfica 4 Espectros de IR del Carbón activado de la cáscara de naranja.	46
Gráfica 5 Espectro de IR del Carbón activado inicial de la cáscara de mandarina	47
Gráfica 6 Espectro de IR del Carbón activado del ciclo 1 de cáscara de mandarina	48
Gráfica 7 Espectro de IR del carbón activado del ciclo 2 de la cáscara de mandarina	49
Gráfica 8 Espectros de IR del carbón activado de la cáscara de mandarina	50

INTRODUCCIÓN

Uno de los recursos más importantes para la vida en el planeta es el agua. Los seres humanos dependemos de su disponibilidad no sólo para el consumo doméstico, sino también para el funcionamiento y la continuidad de las actividades agrícolas e industriales (SEMARNAT, 2012). La alta demanda que tiene este líquido cada vez aumenta, pero también la contaminación.

México, se enfrenta al desafío de atender y resolver una serie de problemas ambientales que podrían ser obstáculos importantes para alcanzar la sustentabilidad en el futuro (SEMARNAT, 2016). Y entre todas las problemáticas a las que se enfrenta el país, está la contaminación de cuerpos de agua debido a las descargas de aguas residuales.

La industria textil y sus aguas residuales han ido aumentando proporcionalmente, convirtiéndose en una de las principales fuentes de graves problemas de contaminación en todo el mundo. En particular, la liberación de efluentes coloreados al medio ambiente es peligroso, y no tan solo por su color, sino también porque muchos tintes de las aguas residuales y sus productos de degradación son tóxicos y/o mutágenos para la vida (Dos Santos et al., 2007).

Y aunque la Norma Oficial Mexicana 001 SEMARNAT (1996) establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales, no se especifica a los colorantes como contaminantes, sin embargo, se han demostrado que estos pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar tóxicos (Zaruma Arias et al., 2018)

La técnica de adsorción ha ganado popularidad debido a su eficiencia en la eliminación de contaminantes. El carbón activado es el método más utilizado para eliminar colorantes por adsorción, el rendimiento depende del tipo de carbón utilizado y de las características de las aguas residuales (Robinson et al., 2001).

La elección de la materia prima para la elaboración del carbón va a depender mucho fundamentalmente por su disponibilidad, precio y pureza. Los materiales lignocelulósicos han sido utilizados ampliamente para la elaboración del carbón activado ya que presentan una adecuada capacidad de adsorción, entre estos se puede recalcar las cáscaras de diversas frutas, como lo son la naranja y mandarina (Solís Fuentes et al., 2012).

De acuerdo con la SAGARPA en el 2017 México es líder en producción de cítricos, principalmente en naranja ya que la mandarina solo se da por temporadas (septiembre-marzo). Su principal uso es para extraer el jugo, por lo que la cáscara de estos cítricos presenta un potencial poco explotado.

En la actualidad la mayoría de los procesos que se realizan van en tendencia a una economía lineal o desechable, en el presente trabajo se optaron como precursores para la elaboración de carbones activados la cáscara de naranja y mandarina, para eliminar colorantes en aguas residuales textiles y así podemos optar por una economía circular, ya que los desechos agroindustriales son aprovechados para producir otro producto como lo es el carbón activado.

Objetivos

General

Analizar la remoción de colorantes en un agua residual textil por adsorción con carbón activado preparado a partir de residuos orgánicos.

Específicos:

1. Obtener el carbón activado a partir de los residuos orgánicos de la cáscara de naranja y mandarina, mediante activación química con ácido fosfórico y calcinación a 500°C.
2. Determinar el grado de adsorción de los contaminantes presentes en el agua residual textil con el carbón activado obtenido.

3. Identificar mediante espectroscopia infrarroja los grupos funcionales y características del carbón activado antes y después de las pruebas de adsorción.

Hipótesis

El carbón activado obtenido de residuos orgánicos (cáscara de naranja y mandarina) permite remover colorantes presentes en las aguas residuales textiles.

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

1.1 Contaminación del agua

La contaminación es la incorporación de agentes extraños al agua, capaces de modificar su composición física, química y calidad (CONAGUA, 2018). Hay varias maneras de clasificar los contaminantes presentes en el agua: ya sea por su naturaleza (químicos, físicos y microbiológicos), por su origen (naturales y antropogénicos), por su estado de agregación (sólidos, líquidos y gases), por el riesgo que implica su presencia (peligrosos y no peligrosos), por la facilidad de ser transformados y mineralizados biológicamente (biodegradables, lentamente biodegradables y no biodegradables o recalcitrantes) y finalmente por el conocimiento de que su presencia afecte a los seres vivos (convencionales y de preocupación emergente) (Metcalf & Eddy, 2003).

Antes de la industrialización, la contaminación del agua solía ser causada por los desechos animales y humanos, lo que provocaba enfermedades transmitidas por el agua. Durante la Revolución Industrial, la gente comenzó a producir hierro fundido a gran escala, quemando carbón vegetal para calentar minerales de hierro a altas temperaturas y también utilizaron otros métodos para refinar otros metales, como níquel, aluminio, titanio, cobalto, platino, cromo, niobio y molibdeno. El uso extensivo de dichos metales resultó en aumentos masivos en la exploración, minería y producción, así como un mayor uso de energía, lo que resultó en problemas de eliminación de desechos y contaminación de los suministros de agua. Además, el crecimiento de las poblaciones urbanas produjo concentraciones de desechos humanos y animales no tratados, y organismos asociados que producen enfermedades en los cuerpos de agua (Cullers, 2020).

El crecimiento poblacional actual con el consecuente aumento de la demanda de recursos hídricos, las condiciones ambientales extremas provocadas por el cambio climático en todo el mundo y el agotamiento y contaminación de las fuentes de agua

disponible para consumo humano es una problemática importante que debe tener una solución lo más pronto posible.

Como muchos países del mundo, México enfrenta problemas que obligan a hacer un frente para poder satisfacer las demandas de sus habitantes, entre ellos destacan la escasez, la contaminación del recurso, la necesidad de mejorar la administración del agua, la falta de ordenamiento ecológico, el impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y la poca inversión en investigación y desarrollo tecnológico en el país (CONAGUA, 2010).

1.1.1 Contaminación por colorantes

Los colorantes son sustancias orgánicas fluorescentes o de color intenso que imparten color a una sustancia incolora, o bien, a un sustrato por medio de una absorción selectiva de luz. Sus moléculas están constituidas por tres diferentes grupos funcionales, el cromóforo, el cual es el grupo responsable de la absorción de luz, dándole la propiedad de color a la molécula; los auxocromos, que le dan afinidad por la fibra e intensifican el color; y por último el solubilizador que le da la afinidad a solventes diversos y está dado por la presencia de iones como $-SO_3^-Na^+$, $-NH_3^+Cl^-$, $-SO_2NH_2^+$, $-O^+Na^+$ (Che Galicia, 2011).

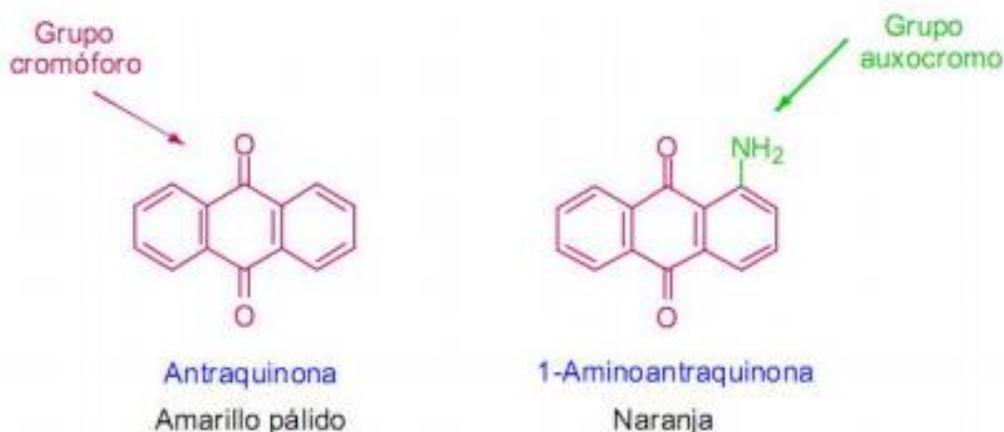


Figura 1 Estructuras químicas con representación de grupos cromóforos y auxocromóforos

Fuente: Gupta y Suhas, 2009

Se conocen alrededor de 100,000 colorantes comerciales y más de 700,000 toneladas métricas se producen anualmente, de las cuales, 35,000-70,000 se descargan en las aguas residuales (Castellar, et al., 2013). Las industrias como la textil, del cuero, la imprenta, productos de cosméticos, farmacéutica, plásticos y alimentos utilizan diferentes tipos de colorantes que también aparecen reflejadas en las aguas residuales descargadas de estas industrias. Las aguas residuales de la industria se han convertido en la principal causa de contaminación de las fuentes de agua debido a sus altos volúmenes y variedad de compuestos presentes en ellas (Castellar-Ortega, et al., 2019, Beltrán- Pérez, et al., 2015).

La presencia de compuestos recalcitrantes y de difícil degradación como los colorantes en fuentes de agua es un problema latente que tiende a incrementarse debido a la gran variedad y usos de estos compuestos en la industria, generando impactos crecientes en el medio ambiente y ecosistemas (Che Galicia, 2011).

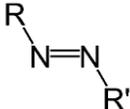
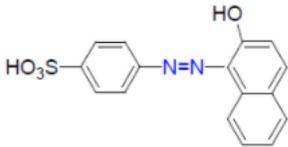
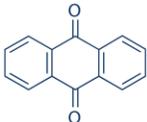
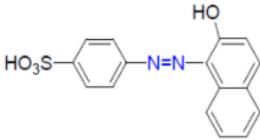
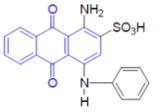
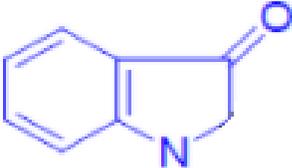
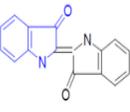
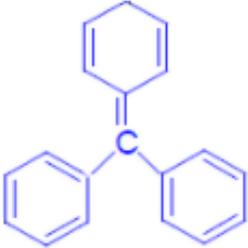
Sin carácter excluyente, pueden considerarse tres enfoques principales para la clasificación de los colorantes (Marcano, 2018):

1. El uso y/o los materiales a los cuales están destinados.
2. Los métodos de aplicación en el teñido de fibras: clasificación tintórea.
3. La constitución química del colorante: clasificación química.

A continuación, se muestra un resumen de cómo podemos clasificar a los colorantes de acuerdo con su grupo cromóforo (Tabla 1) y su forma de aplicación (Tabla 2) teniendo un énfasis en los utilizados en la industria textil.

Y, a pesar de que las tablas no muestran, los colorantes también se usan en aplicaciones de alta tecnología, tales como la medicina, electrónica y principalmente en la imprenta, así como en los alimentos.

Tabla 1 Clasificación de los colorantes de acuerdo con su grupo cromóforo

Familia	Grupo cromóforo	Descripción	Ejemplo
Azoicos		<p>Estos colorantes se caracterizan por tener un grupo funcional azo, consistente en un enlace doble -N=N- unido a átomos de carbono. En cuanto a sus propiedades de color, aportan un rango de matices prácticamente completo y alta intensidad de color. Presentan buenas propiedades técnicas: solidez a la luz, al calor, al agua y a otros disolventes.</p>	 azo (naranja A-1)
Antraquinonas		<p>Los colorantes a base de antraquinonas y quinonas aromáticas policíclicas tienen gran importancia ya que son colorantes ácidos con solidez a la luz, mordentes y dispersos.</p>	 azo (naranja A-1)
Indólicos	 antraquinona (azul brillante)	<p>El compuesto progenitor del grupo de colorantes indigoides, es el índigo, es un colorante de uso común desde tiempos prehistóricos. El índigo natural se obtiene de una planta, la indigofera. Puede reducirse por biodegradación, así como por medio de hidrosulfito de sodio. Una vez reducido puede aplicarse a fibras celulósicas para después oxidarlo y obtener teñidos azules de gran brillantez.</p>	
Trihalometanos	 indigo	<p>Estos colorantes están caracterizados por un grupo cromóforo altamente estabilizado por resonancia, son uno de los colorantes más intensos y brillantes que existen, pero generalmente exhiben poca solidez a la luz.</p>	

Fuente: Hunger, 2003, O'Neill, et al., 1999.

Tabla 2 Clasificación de los colorantes de acuerdo con su aplicación

Clase	Solubilidad	Producto químico principal	Aplicaciones	Problemas ambientales
Ácidos	Solubles en agua	Tipo azo, antraquinona, trihalometano	Nylon, lana, seda, acrílicos modificados y también en cierta medida para el papel, el cuero, la impresión de chorro de tinta, los alimentos y cosméticos.	Ácidos orgánicos, aminas aromáticas.
Básicos	Soluble en agua	Tipo azo, antraquinona, oxazina, triarilmetano	Papel, nylon, poliéster, modificado, también se utiliza para la seda, la lana y el algodón.	Ácidos orgánicos, aminas aromáticas.
Dispersos	Estos son colorantes no iónicos insolubles en agua	Contienen azoicos, antraquinona, nitro y grupos benzodifuranona	En poliéster y en cierta medida nylon, celulosa, acetato de celulosa y fibras de acrílico.	Sales, surfactantes, fosfatos, lubricantes, dispersantes
Directos	Solubles en agua aniónicos	Contienen poliazos, ftalicianinas y oxazinas	Algodón, rayón, cuero y en cierta medida el nylon	Aminas aromáticas, sales, surfactantes
Reactivos	Solubles en agua	Contienen grupos cromóforos como azo, antraquinona, triarilmetano, ftalicianina	Generalmente se utilizan para el algodón y otros materiales celulósicos, pero también se utiliza en menor medida en lana y nylon	Aminas aromáticas, sales, surfactantes
Sulfurados	Solubles en agua	No poseen una estructura determinada	Algodón y rayón, tiene un uso limitado con fibras de poliamida, seda, cuero, papel y madera	Aminas aromáticas, álcalis, agentes oxidantes y reductores
Mordentes	Solubles en agua	Azo y antraquinona	Lana y seda	Aminas aromáticas, sales orgánicas, halogenados.

Fuente: Hunger, 2003, O'Neill, et al., 1999.

Los colorantes sintéticos se utilizan ampliamente en los procesos de teñido de textiles. Las clases principales son los de tipo azo, que incluyen tintes reactivos, dispersos y ácidos. Los tintes azoicos corresponden al 65% de la producción total de tintes en el mundo (Carneiro et al., 2010). De acuerdo con Castellar-Ortega et al, (2019), los colorantes azoicos incorporan la clase más grande y versátil de los colorantes sintéticos, contienen uno o más enlaces azo (-N=N-) como grupo cromóforo en asociación con estructuras complejas que contienen otros grupos funcionales tales como -NH₂, -SO₃, -OH. Además, estos colorantes pueden formar fuertes compuestos de coordinación con iones de metales de transición, como Ni (II), Cr (III), Co (II) y Cu (II) entre otros, formando quelatos azo-metal estables que no pueden metabolizarse ni degradarse.

La presencia de color en los cuerpos de agua incide sobre la diversidad acuática porque impide la penetración de luz solar afectando la fotosíntesis considerablemente, además, se conoce que estos compuestos aromáticos tóxicos, carcinógenos y mutagénicos para los seres humanos (Castellar-Ortega et al., 2019).

Y aunque los particulares tienen las posibilidades de desarrollar procesos voluntarios de autorregulación ambiental, mediante los cuales se comprometan a superar o cumplir mayores niveles, metas o beneficios en materia de protección ambiental, en este caso los recursos hídricos, no siempre los llevan a cabo.

En México, la producción de colorantes ha ido creciendo debido a las altas demandas de productos textiles de la sociedad. Aunado a esto, la incorporación de colorantes textiles cada vez más resistentes provoca la generación de elevados volúmenes de emisarios fuertemente coloreados, constituidos por moléculas complejas que deben ser degradadas antes de su vertido, para esto se necesita un proceso de tratamiento de las aguas. Por lo anterior, la industria textil es una de las mayores fuentes de agua residuales altamente contaminantes y no solo en México, si no también alrededor del mundo (Dos Santos et al, 2007).

Debido a que las aguas residuales textiles son multicomponentes, el daño que provocan a los cuerpos receptores por su vertido es muy grave, los daños que provocan los colorantes azoicos a los seres humanos, se han comprobado, como lo son daño al cerebro, hígado y sistema reproductor, ya que son tóxicos además de ser carcinogénicos. Además, a la flora los perjudica en su proceso de fotosíntesis, como en su crecimiento y en la capacidad de germinación de sus semillas, todo esto en plantas que se encuentren cerca o dentro de los cuerpos de agua receptoras de esta agua residual (Domos Agua, 2018).

1.2 Tratamiento de aguas residuales

En los últimos cien años, el crecimiento poblacional ha demandado un incremento en el requerimiento de agua dulce. Sin embargo, junto a este incremento, ha ido en aumento el problema de contaminación y deterioro de la calidad del agua, debido al escaso e inadecuado tratamiento de las aguas y de los depósitos de residuos fuera de sitios establecido de disposición final, lo que ha reducido notablemente la disponibilidad de este líquido en el planeta (SEMARNAT, 2006).

Las aguas residuales deben ser tratadas antes de que lleguen a cuerpos y cauces naturales para evitar su daño, así como afectaciones a la salud humana debido a enfermedades vinculadas con el agua. En México, de 211 m³ de aguas residuales municipales colectada, se tratan 111.3 m³, es decir, el 52% y de 211.4m³ de aguas residuales industriales generadas, son tratadas 65.6 m³, es decir, el 31% de las industriales (CONAGUA, 2015). Del agua tratada, el grado de tratamiento no es homogéneo ni, necesariamente, el adecuado para lograr un efluente que no contamine al ambiente. De acuerdo con CONAGUA (2019), en todo el país hay 2,642 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) municipales en operación.

En la industria textil cada año se pierden hasta 200,000 toneladas de colorantes, debido a la ineficiencia del proceso de teñido (Ogugbue & Sawidis, 2011). Desafortunadamente, la mayoría de estos tintes escapan a los procesos

convencionales de tratamiento de aguas residuales y persisten en el ambiente debido a todas las características antes descritas. La industria textil es la segunda industria más contaminante del mundo después de la petrolera, ya que, produce el 20% de aguas residuales a nivel mundial y el 10 % de las emisiones de carbono en el mundo (Quiñones, 2018).

De acuerdo con el tipo de contaminantes y la tecnología usada para removerlo del agua, el tratamiento residual se puede subdividir en varias etapas, dependiendo a la planta de tratamiento en la que se realice.

1.2.1 Tratamiento de aguas residuales convencionales

El sistema de aguas residuales está dividido en cuatro procesos de manera general, pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario (SAA/ED, 2014).

I. Pretratamiento

El pretratamiento de acuerdo con Martín, 2011, consiste en la eliminación de los sólidos gruesos o materia de gran tamaño, arenas y grasas y se lleva a cabo mediante procedimientos físicos. Este pretratamiento es fundamental, porque si los materiales que antes se mencionaron llegan a la planta de tratamiento no son eliminados eficazmente, pueden provocar serios problemas en los equipos. Las piedras, arenas, latas, etc. producen un desgaste de las tuberías, bombas, conducciones o algún otro equipo o unidad de tratamiento posterior. A la planta de tratamiento también pueden llegar aceites y grasas de todo tipo, dependiendo del agua residual que se tenga, que, si no son eliminados en el pretratamiento, provocará la ralentización del tratamiento biológico y disminuirá el rendimiento de dicho tratamiento, obteniendo un efluente de baja calidad. Las principales operaciones del pretratamiento son: separación de grandes sólidos, desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado.

II. Tratamiento primario

El objetivo principal del tratamiento primario de las aguas residuales es sedimentar diferentes tipos de sólidos en suspensión, es decir, los sólidos sedimentables, flotantes y coloidales (Metcalf & Eddy, 2003).

Los sólidos sedimentables son los de mayor densidad por lo que precipitan en el fondo de los sedimentadores primarios por acción de la gravedad. Éstos son evacuados periódicamente, tratados y destinados a convertirse en abono para la agricultura. Los sólidos flotantes durante el tratamiento primario de las aguas residuales presentan menor densidad, por lo que flotan de manera natural cuando el agua está en reposo, así que son eliminados mediante una serie de rasquetas que arrastran las partículas desde la periferia al centro del decantador. Y finalmente los sólidos coloidales: son los más estables y no se aprecian a simple vista debido a su tamaño que oscila entre 0.001 y 10 micras, y estos sólidos son los responsables de la turbidez de agua residual y debido a su estabilidad en el agua residual no es posible eliminarlos mediante procesos comunes como la decantación, flotación o filtración, sino que se debe recurrir a una sedimentación inducida; la coagulación y floculación logrando una remoción de sólidos hasta el 85%.

La coagulación y floculación se realiza mediante la prueba de jarras, consta en verter un coagulante en el agua residual para eliminar las cargas eléctricas negativas, para que después, por medio de floculantes las partículas se agrupan, formándose flóculos y finalmente eliminados según su densidad por medio de decantación o flotación. Una vez realizado el tratamiento primario de las aguas residuales y, por tanto, eliminado los sólidos suspendidos, se corrige la alcalinidad o acidez del pH del agua residual añadiendo ácido o bases a agua residual, ya que un pH demasiado alto o bajo puede dificultar la acción de los microorganismos del tratamiento biológico o secundario (Metcalf & Eddy, 2003).

III. Tratamiento secundario

El objetivo principal del tratamiento secundario es remover en su gran mayoría la materia orgánica mediante una serie de importantes procesos de naturaleza biológica que tienen en común la utilización de microorganismos adaptables (entre las que destacan, las bacterias) las cuales se debe tomar en cuenta las condiciones óptimas para que sobrevivan durante el proceso.

Los requerimientos indispensables para que los microorganismos sobrevivan son los nutrientes, la temperatura, el pH, el oxígeno disuelto OD, entre otras. Y entre los métodos que se utilizan durante este proceso son; los filtros biológicos, las lagunas de oxidación, los reactores biológicos de lodos activados, entre otros. Para el crecimiento bacteriano es necesario la presencia de nutrientes, especialmente el nitrógeno y fósforo, y el oxígeno si es que se cuenta con un sistema aerobio. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente, ya que los procesos aerobios utilizan el oxígeno para lograr la eliminación de los contaminantes orgánicos por su transformación en biomasa bacteriana, CO₂ y H₂O, mientras los procesos anaerobios en ausencia de O₂ transforman la sustancia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO₂ (Metcalf & Eddy, 2003).

Existen diferentes tipos de procesos de tratamiento de aguas residuales, y de acuerdo con la CONAGUA (2019), los principales procesos de tratamiento de aguas residuales son los lodos activados (49%) seguidos de los procesos duales (22.7%) y las lagunas de estabilización (9.9%) (Figura 2).

IV. Tratamiento terciario

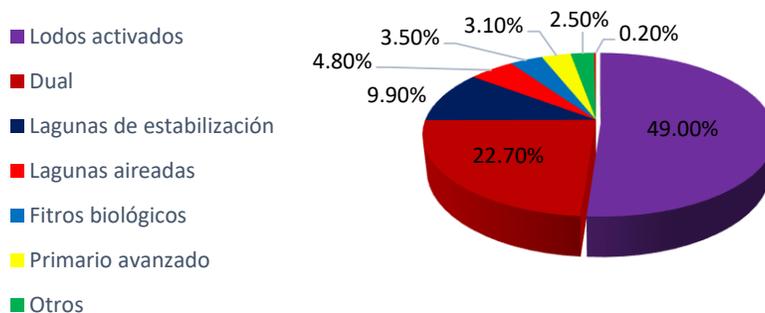


Figura 2 Principales procesos de tratamiento de aguas residuales en México
Fuente: CONAGUA, 2019

El objetivo principal de los tratamientos terciarios es eliminar contaminantes específicos o particulares, la carga orgánica residual y aquellas otras sustancias contaminantes no eliminadas en los tratamientos secundarios, como, por ejemplo, los nutrientes, fósforo y nitrógeno, metales pesados, compuestos azufrados, entre otros. Y aunque en algunos casos el tratamiento terciario solo consiste en la desinfección del agua, también hay procesos de naturaleza biológica o fisicoquímica, siendo este último el proceso unitario más empleado. Otros procesos empleados como tratamientos terciarios son las resinas de intercambios de iones, la adsorción, la ultrafiltración, la osmosis inversa, cloración, entre otros (SAA/ED, 2014).

1.2.2 Procesos alternativos

Por lo general, resulta bastante difícil tratar los efluentes textiles debido a que las industrias producen aguas residuales multicomponentes. Las aguas residuales coloridas contienen una gran cantidad de sólidos suspendidos, una alta demanda química de oxígeno y el pH es fluctuante, lo cual hace que sean difíciles de tratar (Bhattacharyya & Sarma, 2003). Además, el colorante contenido en los efluentes puede variar diariamente e incluso cada hora, estas variaciones oscilan entre 10 y 200 mg/L (Doble y Kumar, 2005).

La investigación de tratamientos eficientes y prácticos para la remoción de colorantes en aguas residuales ha generado un creciente interés en los últimos años. En la figura 3 se resumen las principales tecnologías utilizadas para la eliminación de estos contaminantes. Varios autores reportan las características y aplicaciones de las tecnologías desarrolladas más importantes, y la mayoría de estos autores las dividen en tres principales categorías: biológicos, químicos y físicos, aunque actualmente se opta principalmente por métodos físicos y químicos (Robinson, et al., 2001).

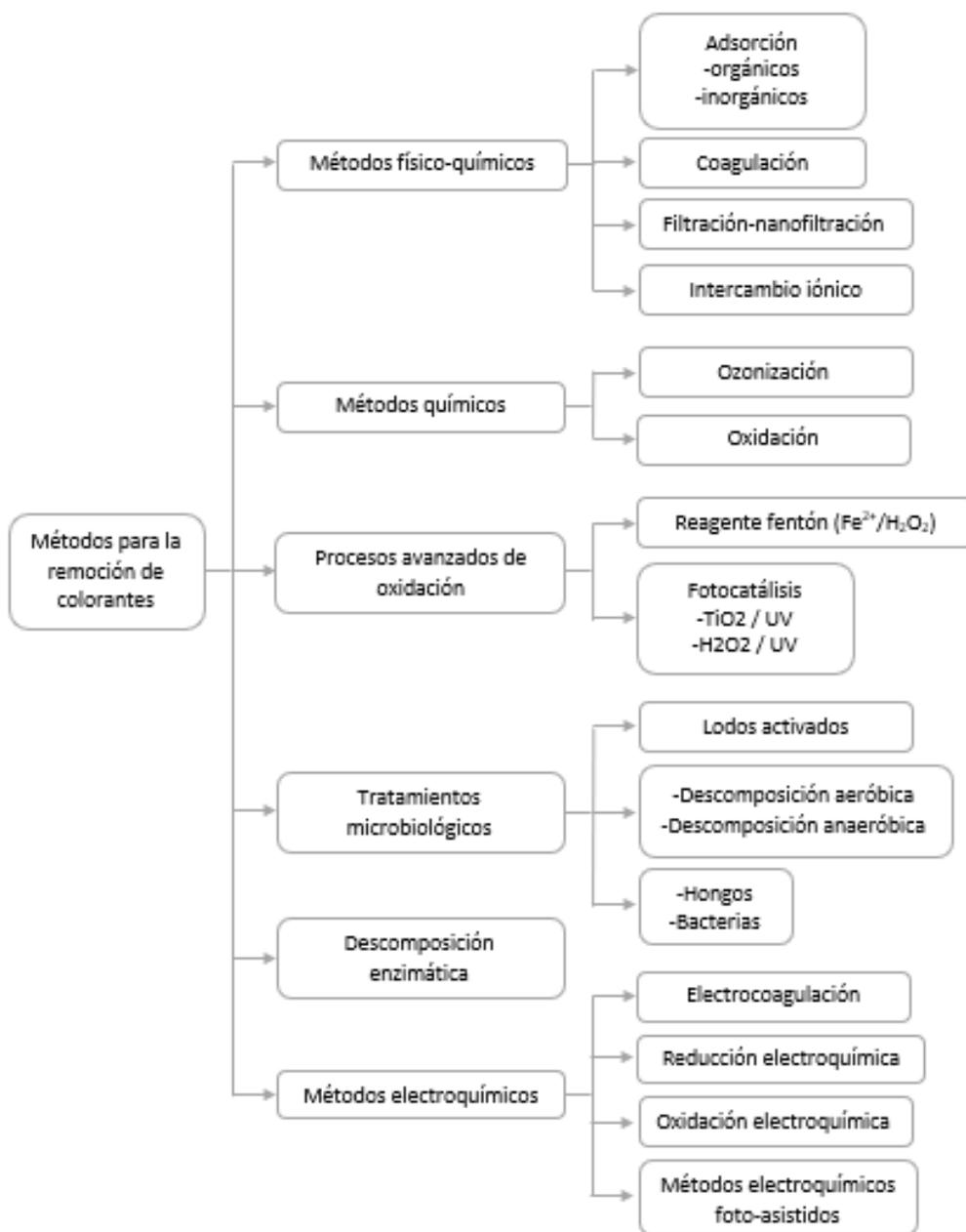


Figura 3 Métodos principales para la remoción de colorantes
Fuente: Che Galicia, 2011

1.3 Adsorción

1.3.1 Generalidades de la adsorción

La adsorción es un proceso mediante el cual se extrae materia de una fase concentrada sobre la superficie de otra fase (generalmente sólida). Por ello se

considera como un fenómeno superficial. La sustancia que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama “adsorbato” y la fase que adsorbe se llama “adsorbente” (Gutiérrez Suárez, 2008).

La adsorción de las moléculas del adsorbato sobre la superficie del adsorbente pueden ser física o fisisorción y química o quimisorción. La diferencia entre ellas radica en el tipo de interacciones entre el adsorbente y el adsorbato. En la fisisorción las interacciones predominantes son de tipo Van der Waals, mientras que en la quimisorción las interacciones semejan enlaces químicos (López Reyes, 2010).

1.3.2 Mecanismo de adsorción

El mecanismo de adsorción (Figura 4), descrito por Weber y Smith (1987) nos dice que la transferencia del adsorbato de la fase líquida hacia un sitio de adsorción se realiza en los siguientes pasos (Durán Pilotzi, 2003):

1. Primero se realiza una transferencia de adsorbato que se encuentra en la fase líquida.
2. Luego hay una transferencia del adsorbato a través de la película líquida hacia la superficie del adsorbente.
3. Seguido de esto hay una difusión al interior de los poros del adsorbente por un gradiente de concentración.
4. Y finalmente se lleva a cabo la adsorción.

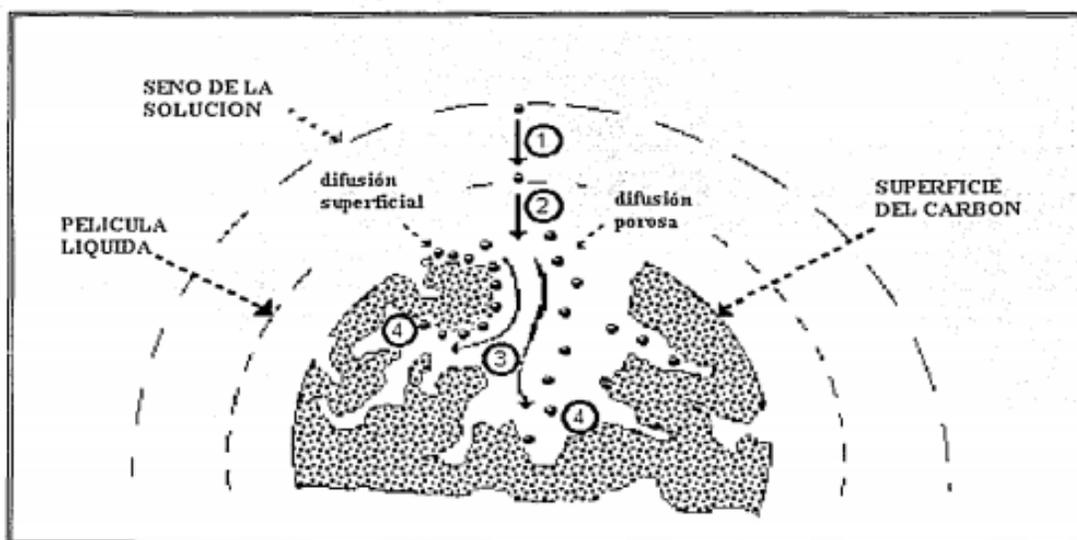


Figura 4 Mecanismos de adsorción propuestos por Weber y Smith, 1987

1.3.3 Factores que influyen en el proceso de adsorción

Debido a que es un mecanismo que se efectúa en serie, hay varios factores que influyen sobre la velocidad y las capacidades de adsorción. Tomando en cuenta que en el proceso participan el adsorbente, adsorbato y la fase, se abordará cada punto por separado.

a) Adsorbente

✓ Área superficial y estructura porosa:

A mayor área, mayor número de sitios activos disponibles y una mayor adsorción. Esto es válido para áreas de hasta 1500 m²/g (McGuire y Suffet, 1978).

✓ Granulometría:

La reducción del tamaño de partícula aumenta la velocidad de adsorción, de acuerdo con una relación inversamente proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula (Najm, et al., 1991).

✓ Composición química:

Dependiendo a los grupos funcionales en la superficie del adsorbente será la selectividad de la adsorción (Gaid, 1981).

✓ Dureza:

Si la partícula no resiste a la adsorción durante el retrolavado y la regeneración, se pierde una cantidad importante de carbón del sistema (Gaid, 1981).

b) Adsorbato

✓ Estructura molecular:

Los compuestos orgánicos de cadena ramificada son menos adsorbibles que los compuestos de cadena lineal (Jiménez Cruz, 1988),

✓ Masa molecular:

Entre más masa molar más adsorbible (Duran Pilotzi, 2000).

✓ Grupos funcionales:

El exceso de carga negativa del átomo de carbón portador no favorece la adsorción: mientras más grande sea ese exceso, menor será la capacidad de adsorción (Jiménez Cruz, 1988).

✓ Ionización:

La ionización no favorece la adsorción sobre carbón activado. De esta forma, un soluto fuertemente ionizado es ligeramente adsorbido (Jiménez Cruz, 1988).

c) Fase

✓ pH:

La capacidad de adsorción aumenta en condiciones de pH bajos con lo cual se disminuye la solubilidad del adsorbato (Montes Rojas, 2000).

✓ Temperatura:

El proceso de adsorción es un proceso exotérmico, en consecuencia, este proceso se ve favorecido cuando la temperatura disminuye (Gaid, 1981).

✓ Mineralización:

La influencia de la concentración de sales en el medio sobre la adsorción depende de las especies iónicas presentes y de la ionización, así como de las características del carbón activado (Gaid, 1981).

✓ Materia Orgánica Natural (MON):

En agua cuya concentración de micro contaminantes es de 0.5 a 5% de la concentración de la materia orgánica natural (MON) presente, se da una competición por los sitios activos entre los micro contaminantes y la MON en la superficie del carbón activado. Además de la MON, de la cual las sustancias húmicas componen la mayor parte, puede haber muchos químicos orgánicos sintéticos que compiten también por los sitios de adsorción de los micro contaminantes (McGuire y Suffet, 1978).

1.3.4 Cinética y equilibrio de adsorción

De acuerdo con Che Galicia (2011) el estudio de la cinética de adsorción en las aguas residuales es importante porque permite entender mejor la ruta de reacción y el mecanismo de la reacción. Además, es importante para predecir el tiempo en que el adsorbato será removido de la solución acuosa y así poder diseñar una planta de tratamiento adecuada.

Para estudiar el equilibrio de adsorción es necesario el empleo de modelos matemáticos, la mayoría de ellos están basados en el concepto de “adsorbente en fase sólida”, donde la adsorción tiene lugar por deposición del adsorbato sobre los poros físicos de la superficie del adsorbente (Volesky, 2003).

Las isotermas de adsorción proporcionan valiosa información para la estimación del rendimiento en un proceso a gran escala. En primer lugar, ayudan a determinar la

posibilidad de alcanzar un alto nivel de pureza para un adsorbente dado. Esto es importante cuando existen varias impurezas y una o más son pobremente adsorbidas. En segundo lugar, las isothermas de adsorción permiten calcular la cantidad de sustancia adsorbida en el equilibrio (q_e), la cual tiene el comportamiento relativo de diferentes tipos de adsorbentes (Che Galicia, 2011).

Existen varios modelos de isothermas, pero las más comunes son las de Freundlich y Langmuir (Volesky, 2003).

- Isoterma de Freundlich

La isoterma de Freundlich (Freundlich, 1906) es un modelo de carácter empírico y es aplicado normalmente a adsorbentes con superficies heterogéneas o que poseen sitios de adsorción con distintas afinidades. La hipótesis de su modelo está basada en:

1. La adsorción es de naturaleza física
2. No hay asociación de las moléculas adsorbidas
3. La superficie del adsorbente es heterogénea
4. Existe una tendencia a la formación de multicapas.

En otras palabras, la adsorción debe ser puramente un proceso físico sin cambio en la configuración de moléculas.

- Isoterma de Langmuir

En 1918, Langmuir propuso un modelo en el cual, consideró la adsorción como un fenómeno exclusivamente químico. Aunque este modelo no aporta información acerca del mecanismo del proceso de adsorción, permite conocer la capacidad máxima de adsorción. La isoterma de Langmuir se basa en los supuestos siguientes:

1. Las moléculas se adsorben sobre un número determinado de sitios localizados en posiciones fijas.

2. Cada sitio de adsorción acepta solamente una molécula y se disponen en forma de monocapa.
3. Todos los sitios son energéticamente equivalentes
4. No existen interacciones laterales entre moléculas adsorbidas
5. La adsorción es reversible

1.4 Carbón activado

1.4.1 Origen del carbón activado

El carbón activado (CA) es un material de alta porosidad que es útil en la adsorción de gases y solutos de una solución acuosa. Por tanto, ha sido ampliamente utilizado para la separación de gases, la recuperación de disolventes, la eliminación de contaminantes orgánicos, como soporte catalítico durante el tratamiento de agua para el uso doméstico o industrial (Hayashi et al., 2000, Bravo Jiménez, 2015). La primera aplicación del carbón activado en el sector industrial tuvo lugar en Inglaterra en 1794, cuando se utilizó como agente decolorante en la industria azucarera, hecho que marcó el inicio de la investigación con carbones activados en fase líquida (Menéndez-Díaz & Martín-Gullón, 2006). En las últimas décadas del siglo XX y hasta la actualidad, la demanda de carbón activado se ha incrementado notablemente, debido a las aplicaciones que se le han dado (Báez Santana, 2019). Los problemas ambientales son cada vez más graves, por lo que se requiere de carbones activados accesibles.

El carbón activado puede obtenerse de diversos materiales como residuos agrícolas y forestales, hulla, lignitos, turba y residuos poliméricos (Manals Cutiño, et al., 2016); dichas materias primas deben poseer propiedades adecuadas de porosidad y niveles de dureza altos, con el fin de ser transformados a carbón activado (Noriega Astroga, 2020). La elección del precursor es fundamental para su disponibilidad, precio y pureza.

1.4.2 Características de carbón activado

Las principales características de los carbones activados están determinadas por sus propiedades físicas y químicas, entre las que es preciso destacar su estructura porosa y su potencial de adsorción (Gómez et al., 2010). Posee estructuras y propiedades similares a las de grafito; tiene una estructura cristalina, retículas, es considerablemente poroso y puede desarrollar áreas superficiales específicas desde $500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ hasta mayores de $1500 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$, esto depende de la materia prima y el proceso de activación empleada (Noriega Astroga, 2020). En cuanto a los poros, cuentan con anchos que varían desde fracciones hasta varios miles de nanómetros y el potencial de adsorción queda determinado por la propia estructura, forma y distribución de la porosidad y por otras condiciones relacionadas con la química de las superficies de los carbones activados (Gómez et al., 2010).

Marsh y Rodríguez-Reinoso (2006) dicen que “Es la porosidad dentro del carbón activado la que imparte sus características dominantes de adsorción. Los carbones activados se preparan a partir de una amplia gama de tipos de carbono (la familia de los carbones) de diferentes estructuras. Como la porosidad y la estructura están tan íntimamente relacionadas, la comprensión de las estructuras en esta gama de carbonos junto con una descripción de sus orígenes y preparación son requisitos previos para el uso eficaz de los carbones activados”.

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) se diferencian tres tipos de poros:

- Microporos: menores a 2 nm
- Mesoporos: entre 2 y 50 nm
- Macroporos: entre 50 y 100.000 nm

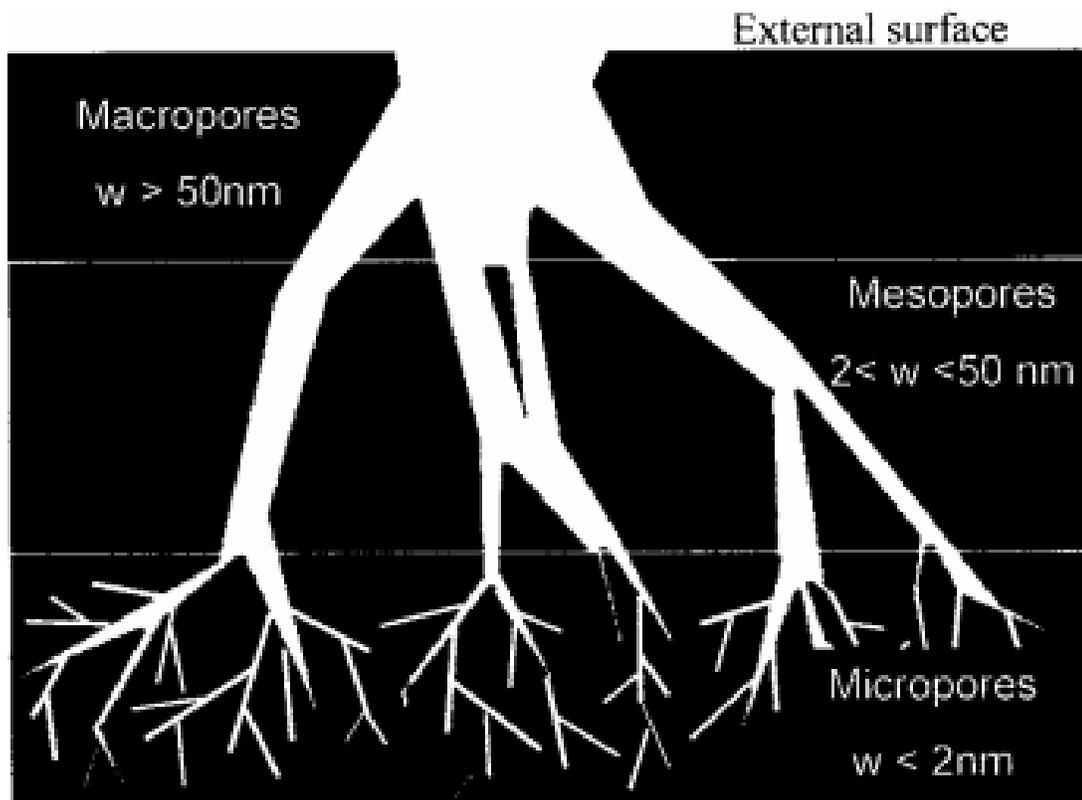


Figura 5 Representación esquemática de la estructura porosa del carbón activado
Fuente: Menéndez-Díaz & Martín-Gullón, 2006

La distribución del tamaño del poro depende fundamentalmente de tres factores: el origen de la materia prima, el tipo de activación, y la duración del proceso de activación.

Pero la capacidad de adsorción del carbón activado no depende solamente de la textura porosa o del área superficial, los grupos químicos presentes en la superficie son otro factor importante en el proceso de adsorción.

1.4.3 Clasificación del carbón activado

Los carbones activados pueden clasificarse dependiendo al tamaño de las partículas, esto es en: carbón activado en polvo (CAP) y carbón activado granular (CAG) (Menéndez-Díaz & Martín-Gullón, 2006).

I. Carbón activado en polvo (CAP):

Los CAP presentan tamaños de partícula menores de 100 micrómetros, siendo los tamaños típicos entre 15 y 25 micrómetros. Su propiedad física más importante es la filtrabilidad y la densidad global o aparente; a mayor densidad global, mayor capacidad para eliminar un adsorbato por unidad de volumen de adsorbente. Los CAP son, aproximadamente, de dos a tres veces más baratos que los carbones en grano; su cinética de adsorción es rápida, puesto que su superficie es fácilmente accesible (Bravo Jiménez, 2015). Pero el CAP debe desecharse después de su uso y no puede reutilizarse.

II. Carbón granular (CAG):

Los CAG representan un tamaño medio de partícula entre 1 y 5 mm, puede dividirse en dos categorías:

- a) Carbón activado sin forma o rota, y
- b) Carbón activado con forma (o con una forma específica, cilindros, discos, etc.).

Los carbones activados sin forma son partículas irregulares, que simplemente se han triturado y tamizado, debido a que el tamaño de las briquetas y ligantes son normalmente grandes. Los carbones con forma pueden obtenerse por peletización o por extrusión de carbón en polvo con distintos tipos de aglomerantes.

Las propiedades físicas más importantes de los CAG son la dureza y el tamaño de partícula. Buena parte del costo de operación con los carbones en grano se debe a las pérdidas por desgaste durante el manejo y la regeneración. Las pérdidas son menores en los carbones más duros (Bravo Jiménez, 2015). Los CAG tienen la ventaja, en comparación a los CAP, de ofrecer una menor caída de presión junto con el hecho de que se pueden regenerar o reactivar y, por lo tanto, reutilizar más de una vez.

La Agencia de Protección Ambiental considera la adsorción de carbón activado granular (CAG) entre las mejores tecnologías disponibles para eliminar compuestos orgánicos sintéticos, compuestos que causan sabor y olor y materia orgánica natural en plantas de tratamiento de agua y aguas residuales (Erdem, et al, 2020).

Y aunque el carbón activado es un adsorbente generalmente satisfactorio, las nuevas aplicaciones exigidas por la tecnología industrial requieren materiales cada vez más sofisticados, como los propone Menéndez-Díaz & Martín-Gullón (2006):

- Fibras de carbón activado
- Tejidos y fieltros de carbón
- Estructuras monolíticas
- Películas de carbón
- Carbones derivados de plantilla
- Nanotubos de carbón



Figura 6 Diferentes formas del carbón activado
Fuente: Menéndez-Díaz & Martín Gullón, 2006

1.4.4 Materia prima

1.4.4.1 Cáscara de naranja y mandarina

La naranja es el fruto del naranjo dulce, árbol que pertenece al género Citrus de la familia rutáceas, al igual que la mandarina pertenece a esa misma familia, pero siendo esta última más pequeña y achatada por su base, y a diferencia de la naranja que se encuentra presente todo el año, la mandarina tiene una mayor abundancia en la época de otoño. Son originarias del sureste de China y norte de Birmania, aunque se le conoce en área mediterránea desde hace aproximadamente 3,000 años (Frutas y Hortalizas, 2020).

La naranja se divide de la siguiente manera (Esquivel Martínez & Martínez Tecanhuehue, 2019) de igual forma que la mandarina:

- Exocarpio, epicarpio o flavedo: Es la corteza exterior de los cítricos. Su color es el resultado de los pigmentos contenidos en la cáscara, además de contener los aceites esenciales que le dan el aroma tan característico.
- Mesocarpio o albedo: Es la parte blanca de la cáscara, tiene un sabor amargo y es rica en pectina. Su composición es 75% agua, 9% azúcares, 6.5% celulosa y lignina, 4% sustancias peptídicas, 3.5% glucósidos, 1.5% ácidos orgánicos y 0.5% de otras sustancias.
- Endocarpio: Es la parte de la pulpa que se destaca por su dulzor y por ser rica en fibra.
- Semillas: Son de sabor amargo, producen un aceite amarillento rico en limonoides hesperidina y ácidos grasos con un alto valor dietético.
- Eje central: Es el cordón blanco que se encuentra en el centro de la fruta.
- Gajos: Son los trozos individuales de la naranja y/o mandarina, que se encuentran separados por dos membranas a cada lado.

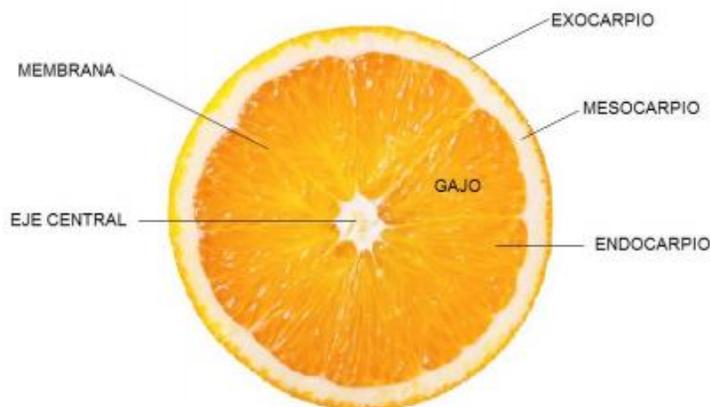


Figura 7 Estructura de la naranja y mandarina

México es uno de los líderes en producción de cítricos, ya que se ubica como el quinto productor a nivel mundial con un 4.6% del total, detrás de China 21%, Brasil 18%, Estados Unidos 8% e India 6%. Los estados de mayor importancia en la producción son Veracruz, que aporta 44% del total nacional; Tamaulipas, con 14% y San Luis Potosí, con 8%, pero también se producen en estados como Puebla, Yucatán, Tabasco, Sonora, Hidalgo, Oaxaca y Nuevo León (SAGARPA, 2017).

Las naranjas producidas en México son principalmente destinadas al consumo del mercado doméstico. Los consumidores mexicanos prefieren consumir sus naranjas en jugo fresco, pero también se aprovecha para elaborar mermeladas, aceites, esencias (SAGARPA, 2016). La cáscara representa aproximadamente del 45 al 60 % del peso de la fruta, y por lo antes mencionado solo se aprovecha la cáscara para obtener aceites, pero no hablan de un carbón activado.

Por otro lado, en México se siembran 21 mil 675 hectáreas de mandarina en 19 estados, lo que da como resultado una producción de 300 mil 065 toneladas de mandarinas, teniendo como principales estados productores a Veracruz, Puebla y Nuevo León (SAGARPA, 2020).

En el presente trabajo el material orgánico escogido es la cáscara de naranja y mandarina, para sacar el máximo provecho a este residuo, ya que diariamente son desechados por diferentes industrias.

En la tabla 3 se muestra la composición fisicoquímica de la cáscara de naranja y mandarina respectivamente para tener una mejor comparativa de estos productos.

Tabla 3 Composición fisicoquímica aproximada de la cáscara de naranja y mandarina

Parámetro	Unidades	Valor	
		Naranja	Mandarina
Peso*	g	6.8 ± 1.1	2.6 ± 0.2
Sólidos solubles	°Brix	7.1 ± 1.2	9.8 ± 0.06
pH	-	3.93 ± 0.03	4.2 ± 0.04
Humedad	(mg/100g) base seca	3.31 ± 0.19	4.33 ± 0.07
Grasa	(mg/100g) base seca	1.64 ± 0.13	1.45 ± 0.16
Cenizas	(mg/100g) base seca	4.86 ± 0.02	3.96 ± 0.21
Proteína	(mg/100g) base seca	5.07 ± 0.25	7.55 ± 0.24
Calcio	(mg/100g) muestra seca	27.34 ± 0.31	50.25 ± 0.24
Magnesio	(mg/100g) muestra seca	8.64 ± 0.11	15.61 ± 0.33
Zinc	(mg/100g) muestra seca	0.38 ± 0.11	0.44 ± 0.08
Ácido Ascórbico	(mg/100g) muestra seca	16.25 ± 1.43	12.32 ± 1.83
Carotenoides totales	(mg/100g) muestra seca	2.25 ± 0.17	11.03 ± 0.53
Carbohidratos	% (en base seca)	89 ± 1.1	n.r
Fibra soluble	% (en base seca)	1.77 ± 0.02	1.23 ± 0.01
Azúcares neutrales		3.8 ± 0.3	
Ácido urónico		1.04 ± 0.18	
Fibra insoluble	% (en base seca)	48.03 ± 2.04	51.66 ± 0.02
Azúcares neutrales		17.1 ± 1.6	
Ácido urónico		7.1 ± 0.9	
Lignina		3.2 ± 0.4	
Celulosa	% (base seca)	23.5	20.2
Hemicelulosa	% (base seca)	10.4	7.8
Pectina	% (en base seca)	17 ± 4	n.r
Aceites esenciales	ml/Kg	1.45 ± 0.16	n.r

n.r: No hay datos reportados *promedio de una pieza

Fuente: Espachs-Barroso et al., 2005; Rincón et al., 2005; Tejeda, 2014.

1.4.4.2 *Economía Circular*

De acuerdo con los procesos que manejan la mayoría de las industrias, utilizan una economía lineal, es decir, una vez terminada la vida útil del producto se desecha. Sin embargo, la economía circular busca que el producto, una vez que cumple su vida útil con el consumidor vuelva a ser insertado a la cadena productiva, así eliminando el concepto de “residuo”, el cual presenta un gran impacto ambiental al disminuir los residuos sólidos que contribuyan a la contaminación global (Morales Apaza et al., 2021).

Las características clave de una economía circular de acuerdo con Cerdá y Khalilova (2016) son:

- Reducción de insumos y utilización de lo menos posible recursos naturales.
- Compartir en mayor medida la energía y los recursos renovables y reciclables.
- Reducción de emisiones.
- Disminuir pérdidas de materiales y de los residuos, y
- Mantener el valor de los productos, componentes y materiales en la economía.

En México de acuerdo con el último informe proporcionado por la SEMARNAT (2012), de los residuos sólidos urbanos que se generan, el 52.4% son orgánicos, es decir, son residuos de comida, jardines, etc., por lo que se incluyen las cáscaras de naranja y mandarina. Y, aunque no se cuente con un dato exacto de cuanta cáscara se genere en México, se tiene un aproximado con la producción de estos cítricos, ya que de estos frutos solo se aprovecha el jugo y la cáscara se desecha.

Es por esto que, con una economía circular, se podrá dar un segundo uso a un residuo y así terminar con la economía lineal que por lo general las industrias acostumbran.

1.4.5 Aplicación del carbón activado en adsorción

La Agencia para la Protección Ambiental de EE.UU. (USEPA) recomienda el carbón activado como una de las mejores tecnologías disponibles para la remoción de contaminantes orgánicos (Mukherjee et al., 2007). La capacidad de adsorción del carbón activado depende en gran medida de su porosidad y superficie. La propiedad de textura de los carbones activados depende del método de preparación y del material de partida.

En la producción de carbón activado, las materias primas con alto contenido de carbono (40-80%) y bajo contenido de sustancias inorgánicas se someten a varios procesos previos como lavado, refinado y molienda (Balçık et al., 2020). Después del pretratamiento, se aplica carbonización térmica (pirólisis) a 500- 950°C en un ambiente libre de oxígeno (Menéndez-Díaz & Martín-Gullón, 2006). En esta etapa, la humedad y las sustancias volátiles se alejan de la materia orgánica y la proporción de carbono de la estructura aumenta, la reticulación con alta temperatura crea una textura dura porosa (Balçık et al., 2020). Después de la carbonización, el proceso de activación se aplica a alta temperatura.

Dado que el proceso de activación aplicado cambiará las propiedades químicas del carbón activado a producir según el área de aplicación, se pueden aplicar dos métodos diferente como la activación física (térmica) y la activación química (Maldhure & Ekhe, 2011), por lo que a continuación se describe cada una de las activaciones antes dichas.

1.4.5.1 Activación térmica (física):

La activación física es un proceso de dos pasos (aunque no necesariamente). El primer paso es la carbonización térmica de la materia prima, realizada a temperaturas medias o altas, para producir un carbón rico en carbono. El segundo paso es la activación del carbón resultante a altas temperaturas en presencia de CO₂, vapor, aire o tres mezclas que sirven como gases oxidantes en hornos de combustión directa. El CO₂ se utiliza habitualmente como gas de activación siendo fácil de manipular, limpiar y posee una

velocidad de reacción lenta a una temperatura en torno a los 800°C, lo que facilita el control del proceso de activación. Se encontró que un rango de temperatura de 400°C y 850°C es la temperatura de carbonización, aunque a veces puede alcanzar hasta 1000°C mientras que la temperatura de activación está entre 600°C y 900°C. El carbón activado producido mediante el método de activación física es de alguna manera deficiente en algunas cualidades, lo que los hace inadecuados para su uso como filtros o adsorbentes (Menéndez-Díaz & Martín-Gullón, 2006, Tadda, et al, 2016)

1.4.5.2 Activación química:

La activación química provoca la modificación física y química de la estructura original al penetrar el hinchamiento de las partículas y la disolución parcial de la biomasa, la ruptura de enlaces y la reformación de una nueva estructura polimérica resistente a la descomposición térmica (Maldhure & Ekhe, 2011).

En el proceso de activación química, implica múltiples pasos que ocurren simultáneamente, tanto la carbonización como la activación, con los agentes activantes químicos mezclándose con el precursor, como oxidantes y deshidratados. La materia prima se impregna primero con cantidades apreciables de un agente químico (la proporción habitual de reactivo químico frente a materia prima es de alrededor de 1:4) y luego se calienta. El producto debe lavarse para eliminar cualquier exceso de agente químico después de la carbonización. La temperatura del tratamiento térmico depende del agente químico que se utilice. Realizar la activación y la carbonización simultáneamente durante el proceso de activación química a menor temperatura da como resultado mejores estructuras porosas de carbón activado, aunque la preocupación por la protección ambiental puede limitar el uso de agentes químicos para la activación. Además, algunos productos químicos que se utilizan ampliamente como agentes activadores son el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), el hidróxido de potasio (KOH), el ácido fosfórico

(H_3PO_4) y el carbonato de potasio (K_2CO_3) (Menéndez-Díaz & Martín-Gullón, 2006, Tadda, et al, 2016).

Durante la fase de activación, las sustancias volátiles que se forman como resultado de la reacción de combustión del carbono se combinan con el oxígeno y se alejan del medio ambiente, aumentando así el volumen de poros y la superficie (Balçık, 2020). Después de la activación, se suele lavar con agua desionizada y luego secar para eliminar las impurezas debidas al uso de productos químicos. Los carbones activados producidos se muelen y moldean bajo presión según el área de aplicación (Menéndez-Díaz et al., 2006).

1.4.6 Aplicaciones de la adsorción por carbón activado

La adsorción por carbón activado ofrece una extensa gama de servicios, a continuación, se enlistan algunos ejemplos de acuerdo a Durán Pilotzi (2003):

- Remoción de compuestos que causan olor y sabor en agua.
- Purificación de agua para industrias como la farmacéutica, química, etc.
- Eliminación de aceites y grasas disueltas en condensados de retorno a calderas.
- Como pretratamiento de un sistema biológico.
- Remoción de compuestos carcinógenos.
- Recuperación de solventes.
- Purificación de aire, entre otros.

1.4.7 Regeneración

Los métodos de regeneración se aplican para reutilizar carbones activados saturados con contaminantes como compuestos orgánicos e inorgánicos, iones metálicos tóxicos, metales pesados, colorantes, pesticidas y fármacos, y para concentrar el material adsorbido (Balçık, 2020). Los más comunes de estos métodos son (Gamal, et al., 2018):

- ♣ Regeneración por vapor: aquí el vapor proporciona la rápida desorción de contaminantes y la eliminación de adsorbato.

- ▲ Regeneración térmica: consiste en la pirólisis de contaminantes reactivos densos secados a 105°C mediante hornos de tambor, lecho fluidizado u hornos estacionarios con un gas oxidante (vapor de agua o CO₂) en atmósfera inerte y gasificación de contaminantes orgánicos. La oxidación térmica también erosiona la capacidad de adsorción y la resistencia mecánica del carbón activado.
- ▲ Regeneración química: se utilizan ciertos reactivos químicos ácidos y alcalinos para disolver o descomponer los adsorbentes según su reactividad. Esta regeneración normalmente conduce a un desgaste de carbono cero y permite la recuperación de la capacidad de adsorción.
- ▲ Regeneración por oxidación acuosa: aquí los contaminantes tóxicos se descomponen en ambientes acuosos para crear especies menos tóxicas.
- ▲ Bio-regeneración: Los microorganismos se utilizan para regenerar la capacidad y la superficie del carbono, y se aplica ampliamente para la desorción de compuestos orgánicos fenólicos y sustancias orgánicas. La bio-regeneración depende de factores como la biodegradabilidad del contaminante, la fuerza de la interacción del carbono contaminante y las propiedades físico-químicas de la configuración del proceso de carbón activado. Los mecanismos de bio-regeneración y desorción del carbón activado dependen de parámetros como el gradiente de concentración, las reacciones de exoenzimas, la concentración de oxígeno disuelto, el tipo de microorganismo, el tiempo de contacto del sustrato con el carbón.
- ▲ Regeneración electroquímica: los contaminantes orgánicos adsorbidos sin altas temperaturas y sin ninguna adición química se rompen en su lugar, mientras que la integridad estructural y las propiedades del carbono no se ven afectadas. El campo eléctrico aplicado en el proceso elimina los iones polares y las moléculas del electrolito, que luego se adsorben en la superficie de los electrodos. Los contaminantes de oxidación electroquímica en el ánodo se convierten en dióxido de carbono y agua. La regeneración

electrolítica es el método aplicado para la desorción de sustancias orgánicas, colorantes y fármacos disueltos a partir de carbón activado.

- ▲ Aplicación hidrotermal: es un método adecuado para la remoción y extracción de contaminantes orgánicos como medicamentos y pesticidas.
- ▲ Regeneración por microondas: Este tipo de regeneración, especialmente aplicada en la desorción de compuestos fenólicos, requiere menos energía que los procesos de regeneración tradicionales, y se proporciona una recuperación más segura y rápida en términos de la capacidad de adsorción del carbón gastado.

Como se describió, los métodos de regeneración varían la capacidad de adsorción que recupera el carbón activado, la cantidad de adsorbatos removidos y sin remover y el grado de deterioro en el carbón residual. Dependiendo del material adsorbido, pueden variar considerablemente los requerimientos para removerlo, así como el impacto de la remoción en las condiciones del carbón activado original.

CAPÍTULO II METODOLOGÍA

2.1 Preparación del carbón activado

1. Pelar naranja y mandarina para obtener la cáscara y después poner a secar al sol con el fin de eliminar la mayor parte de humedad presente.
2. Triturar las cáscaras para obtener 25 g de cáscara seca.
3. Preparar una solución al 2% de H_3PO_4 y agua desionizada, en la cual se colocarán 20 g de ácido fosfórico en matraz aforado de 1000 ml.
4. Colocar los 25 g de cada muestra por separado en vasos de precipitado con 250 ml de la solución de H_3PO_4 y mantener en agitación por 2 horas.
5. Posterior a las 2 horas, separar la muestra de la solución, colocar en cápsulas de porcelana y calcinar la muestra en mufla a $500^{\circ}C$ por 1 hora. Retirar el exceso de la solución de ácido, para colocar la cáscara en cápsulas de porcelana.

6. Realizar lavados de la muestra calcinada con agua desionizada para eliminar los residuos de H_3PO_4 hasta obtener un pH de 5, los cuales consisten en sumergir la muestra en agua y ponerlos en agitación durante 2 horas a $70^\circ C$, medir el pH con tiras colorimétricas y filtrar la muestra hasta obtener el pH requerido.
7. Secar la muestra en estufa durante 2 horas a una temperatura de $105^\circ C$.
8. Tamizar la muestra para obtener un tamaño de partícula de 0.0083 pulgadas. (Solís Fuentes, et al., 2012)

2.2 Pruebas de adsorción de contaminantes

1. Colocar 2 gramos de carbón activado tamizado con 250 ml de agua residual textil y mantener en agitación tenue durante 24 horas (ciclo 1).
2. Posterior al tiempo de agitación, dejar sedimentar el carbón activado por 24 horas, posteriormente filtrar el agua tratada y secar el carbón a $105^\circ C$ por 2 horas.
3. Colocar el carbón activado seco nuevamente con 250 ml de agua residual textil y mantenerlo en agitación tenue por 24 horas (ciclo 2).
4. Dejar sedimentar el carbón por 24 horas y posteriormente separar el agua del carbón.
5. Secar el carbón nuevamente en la estufa por 2 horas a $105^\circ C$. (Timur et al., 2006)

2.3 Caracterización del carbón por espectroscopia infrarroja

1. Realizar la caracterización mediante la técnica de espectrofotometría infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) del carbón activado inicial y el utilizado después de cada ciclo empleando el equipo de la marca Perkin Elmer y modelo Spectrum One. A continuación, se describe el procedimiento que debe seguirse:
 - 1.1 Quitar los desecadores del espectrofotómetro y encender.

- 1.2 Encender la computadora, entrar al sistema del spectrum y realizar un background.
- 1.3 Cambiar el sistema de ATR, colocar el plato y la punta correspondiente en el sistema ATR.
- 1.4 Realizar un background con el sistema de ATR.
- 1.5 Colocar la muestra del carbón activado.
- 1.6 Entrar al menú instrument.
- 1.7 Entrar al “menu monitor” y revisar la fuerza de aplicación, esta no debe de pasar el 50% siempre quedando en la línea verde.
- 1.8 Entrar al “menu scan”, colocar el nombre y revisar las condiciones del escaneo, luego presionar “apply” y finalmente “scan”.
- 1.9 Entrar al “menú process” y realizar la corrección de la línea base y la eliminación del ruido.

CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo se divide en tres apartados de acuerdo con los objetivos específicos planteados en este trabajo, iniciando con la elaboración del carbón activado, seguido de las pruebas de adsorción y finalmente las pruebas de infrarrojo.

3.1 Descripción del carbón activado

El carbón activado se elaboró de una manera satisfactoria y sin ningún inconveniente. En la figura 8 se observa el estado inicial de la cáscara de naranja comparada con su carbón activado CAN, y en la figura 9 se muestra la cáscara de mandarina con su respectivo carbón activado (CAM).

Con ninguna de las dos materias primas se tuvo problemas en su elaboración, esto quiere decir que la solución de ácido fosfórico al 2% fue el indicado para tener un carbón activado como el que se pretendía lograr, y aunque algunos autores utilizan soluciones con mayor porcentaje como lo es Solís Fuentes et al. (2012) que para elaborar carbón activado a partir de cáscara de naranja y cascarilla de café lo utiliza

al 40 % y 85%, o como lo menciona también Peña et al. (2012) al elaborar carbón activado a partir de cáscara de naranja con soluciones de ácido fosfórico que van del 32% al 48%, en el presente trabajo se logró con menos ácido, esto es bueno, ya que el proceso es más barato al utilizar menos producto y no se tuvieron que realizar demasiados lavados para subir el pH del carbón activado obtenido.

Se hicieron el mismo número de lavados para subir el pH a 5, en este caso fueron seis lavados con agua desionizada, y con las tiras colorimétricas se midieron los pH de cada una de las muestras, gracias a esto también no se generaron demasiados residuos, ya que si se utilizaba más ácido fosfórico sería más difícil subir el pH y también había una posibilidad de convertir en cenizas la muestra.



Figura 8 Cáscara de naranja inicial y el carbón activado CAN
Fuente: Elaboración propia



Figura 9 Cáscara de mandarina y su carbón activado CAM

Fuente: Elaboración propia

De los 25 g de cáscara inicial de naranja y mandarina se obtuvieron un poco más de 3 g de carbón activado, esto debido a que en los lavados se quedó impregnado carbón en el papel filtro que se utilizó.

Cabe resaltar que en la literatura si se menciona la elaboración de carbones activado a partir de residuos orgánicos, como lo es la cáscara de naranja (Solís Fuetes et al., 2012, Peña et al., 2012, García y Granillo, 2017), pero elaborarlo de cáscara de mandarina es novedoso, ya que no se había realizado.

3.2 Capacidad de adsorción de los colorantes

Estas pruebas fueron realizadas solamente de manera visual. En la figura 10 se observa la coloración azul del agua residual textil cruda en comparación del primer ciclo en contacto con el adsorbente (CAN), en el cual ha desaparecido por completo el color, lo que se interpreta como una adsorción total de los colorantes presentes en la estructura del carbón activado obtenido de cáscara de naranja y en la figura 11 se muestra con el segundo ciclo, en el cual el carbón activado continúa adsorbiendo los colorantes del agua residual, por lo que se determina que tiene una alta capacidad de adsorción por colorantes textiles.

Y aunque solo se realizaron dos ciclos de adsorción con el CAN se mostró una eficiencia muy buena de este, por lo que se puede utilizar para otro ciclo y así sucesivamente hasta que ya no adsorba el color y saber cuántos ciclos es capaz de adsorber el color este tipo de carbón.

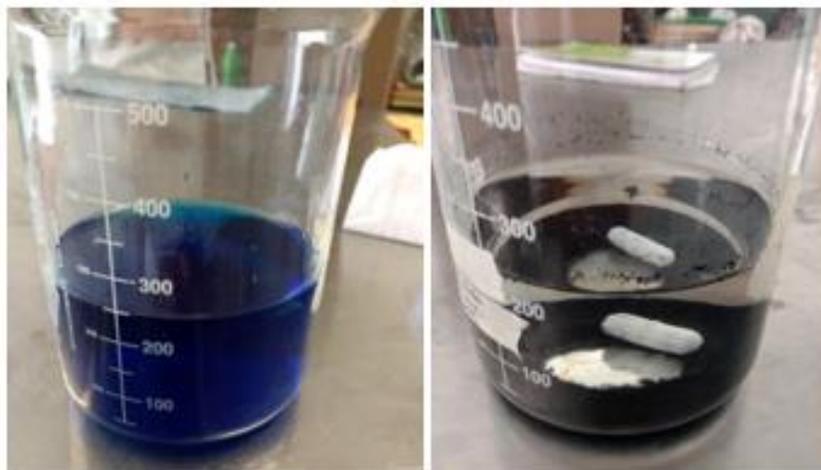


Figura 10 Comparación del agua residual textil en el primer ciclo en contacto con el carbón activado de cáscara de naranja
Fuente: Elaboración propia



Figura 11 Segundo ciclo del carbón activado de cáscara de naranja con el agua residual textil
Fuente: Elaboración propia

En la figura 12 se aprecia el agua residual textil en contacto con el carbón activado de cáscara de mandarina y como es que este adsorbente removió por completo el

color del agua residual después de 24 horas de estar en agitación tenue, sin embargo, en la figura 13 se observa el segundo ciclo en el que actuó el carbón activado y a comparación con el primer ciclo, no adsorbió por completo el color, por lo que, no tuvo una eficiencia tan buena como el CAN.



Figura 12 Pruebas de adsorción del carbón activado de cáscara de mandarina con el agua residual textil ciclo 1
Fuente: Elaboración propia



Figura 13 Segundo ciclo del carbón activado de cáscara de mandarina con el agua residual textil
Fuente: Elaboración propia

Como se realizaron al mismo tiempo las pruebas de adsorción de los dos carbones activados, durante el primer ciclo se percibió una notoria diferencia en cuestión de

tiempo, ya que el carbón activado de cáscara de naranja adsorbió el color en tan solo 15 minutos, mientras que el carbón activado de cáscara de mandarina tardó más de 2 horas en remover el color, pero al final del primer ciclo ambas muestras quedaron totalmente transparentes, por lo que hay una alta capacidad de adsorber los colorantes del agua residual textil en los dos carbones activados preparados.

Durante el segundo ciclo ambas muestras tardaron un poco más en remover el color en comparación con el primer ciclo, pero al igual que el anterior, el carbón activado de cáscara de naranja es el más eficiente, ya que después de las 24 horas, el carbón activado de cáscara de mandarina no removi6 totalmente el color y el de cáscara de naranja si lo hizo.

Cabe mencionar que en la literatura si se encuentra evidencia de remoci6n de colorantes como amarillo anaranjado y colorantes azoicos con carbones activados a partir de residuos agr6colas (Ensuncho et al., 2015, Valenzuela y Torres, 2020) como lo son la cáscara de coco, cascarilla de arroz, tusa de ma6z y cáscara de nuez, pero no de mandarina ni naranja, y mucho menos a aguas residuales textiles reales, por lo cual, se destaca lo novedoso que es el procedimiento para adsorci6n de colorantes de este trabajo.

3.3 Identificaci6n de grupos funcionales

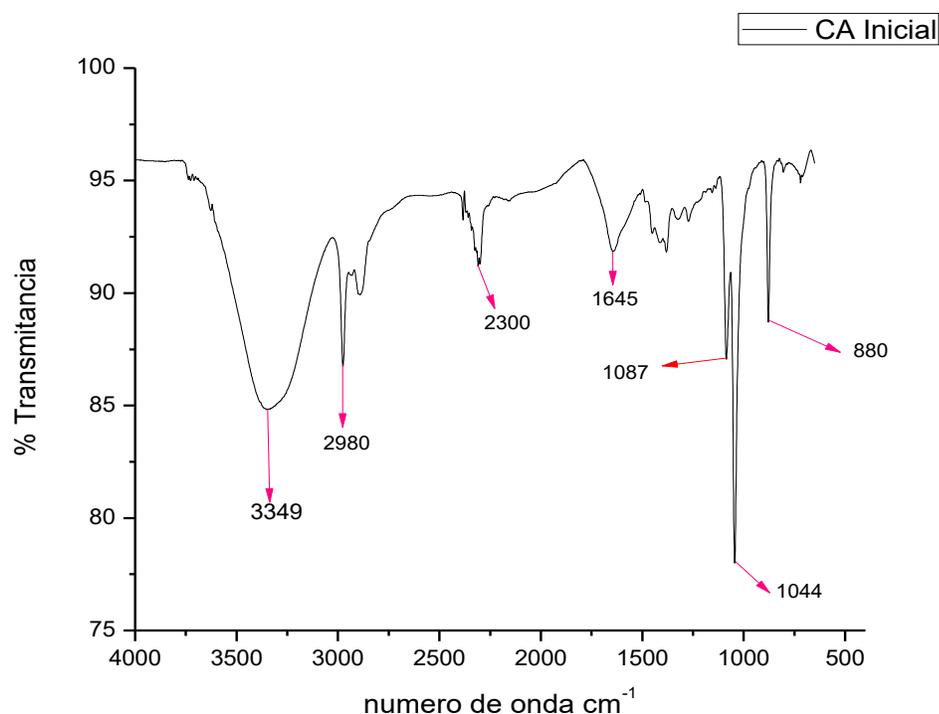
La espectroscopia infrarroja se debe a las vibraciones de los enlaces y proporciona evidencia de los grupos funcionales presentes (Wade, 2011). En la escala vertical se representa la transmitancia, en la escala horizontal es lineal para el n6mero de onda, que es proporcional a la frecuencia y, por consiguiente, a la energ6a (Skoog, et al., 2005).

Un espectro de absorci6n infrarroja, incluso el de un compuesto relativamente sencillo, contiene una gama muy numerosa de bandas bien definidas y m6nimas. Por lo que no es f6cil interpretar los espectros de IR porque los picos obtenidos suelen ser una suma de las interacciones de diferentes tipos de grupos. Adem6s, el IR no proporciona informaci6n cuantitativa sobre la presencia de funcionalidades

individuales en la superficie del carbono (Shafeeyan et al., 2010). Las vibraciones de los estiramientos sencillos en la región de 1600 a 3500 cm^{-1} son las más características y predecibles, mientras que la región de 600 a 1400 cm^{-1} son vibraciones complejas, esta región se llama huella digital del espectro (Wade, 2011).

La tabla de referencias de las frecuencias IR (apéndice 1) de acuerdo con Wade en 2011, presenta las frecuencias características de los estiramientos y flexiones.

En la gráfica 1 se muestra el espectro IR del carbón activado de la cáscara de naranja en su estado inicial, situando un énfasis en sus picos de absorción más notables, y en la tabla 4 se muestran que grupos funcionales son los más representativos de acuerdo a su número de onda (Wade, 2011).



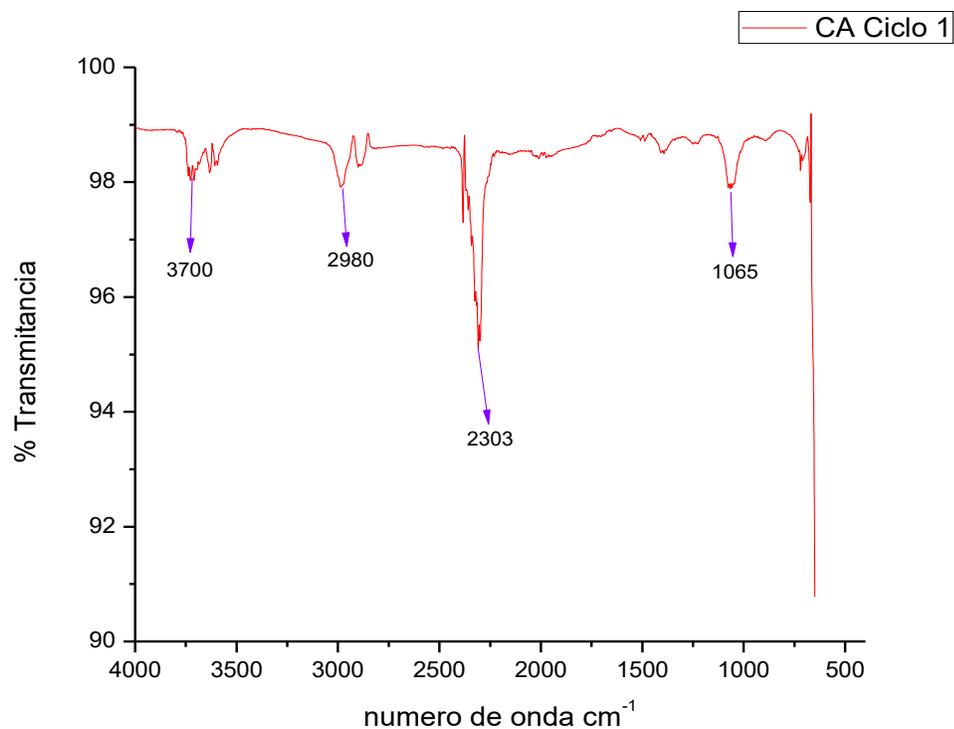
Gráfica 1 Espectro de IR del carbón activado inicial de la cáscara de naranja
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado inicial de cáscara de naranja

Grupo funcional	Frecuencia (cm ⁻¹)
<i>O – H Alcohol</i>	3349
<i>C – H Alcano</i>	2980
<i>–C ≡ N Nitrilo</i>	2300
<i>C = C Alqueno</i>	1645
Alcoholes y fenoles: O-H Alcoholes secundarios	1087
Vibraciones de tensión S=O: Sulfóxidos	1044
Compuesto halogenado C-F	880

Fuente: Wade, 2011

En la gráfica 2 se muestra el espectro de infrarrojo del carbón activado a partir de cáscara de naranja después del primer ciclo con el agua residual textil y en seguida se muestra la tabla 5 con los grupos funcionales más representativos.



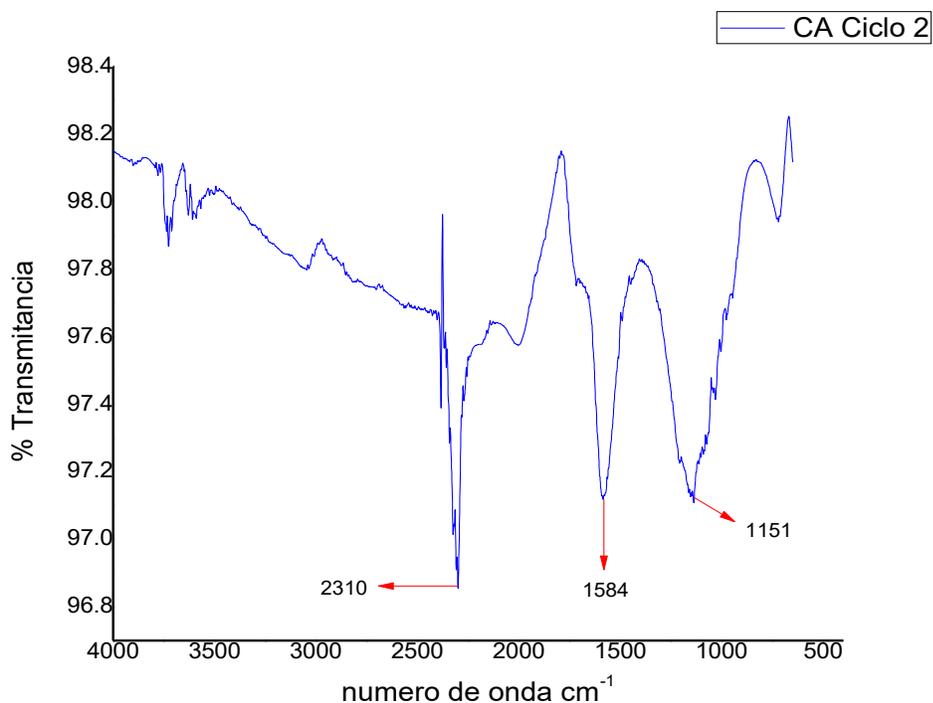
Gráfica 2 Espectro de IR del carbón activado del ciclo 1 de la cáscara de naranja
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de naranja después del primer ciclo

Grupo funcional	Frecuencia (cm ⁻¹)
<i>O – H Alcohol</i>	3700
<i>C – H Alcano</i>	2980
<i>–C ≡ N Nitrilo</i>	2303
Vibraciones de tensión S=O: Sulfóxidos	1065

Fuente: Wade, 2011

En la gráfica 3 se muestra el espectro de infrarrojo del carbón activado a partir de cáscara de naranja después del segundo ciclo en contacto con el agua residual textil y en seguida se muestra la tabla 6 con los grupos funcionales más representativos del anterior IR.



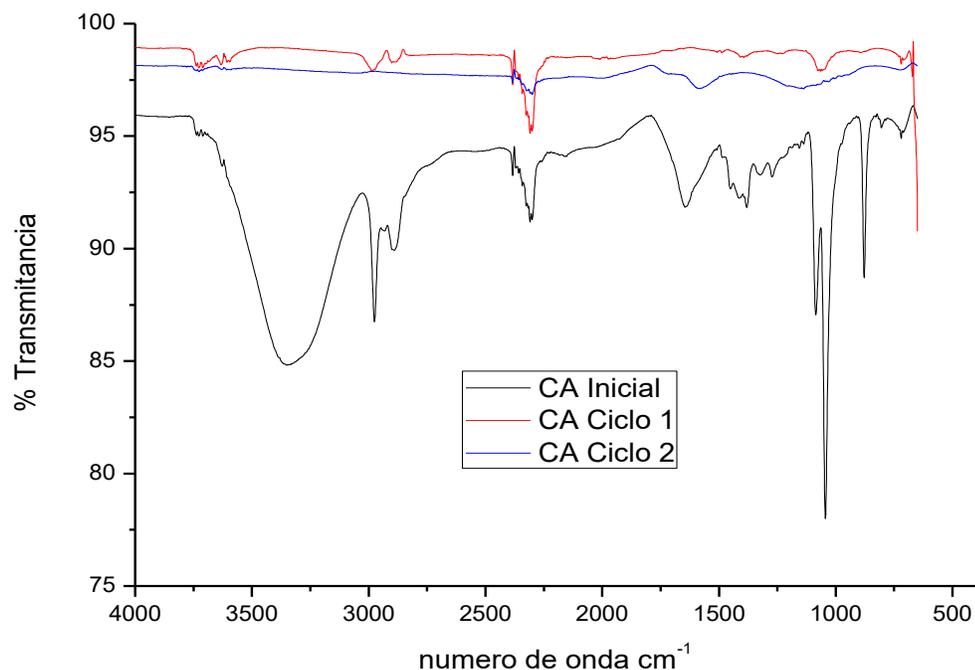
Gráfica 3 Espectro de IR del carbón activado del ciclo 2 de la cáscara de naranja
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 6 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de naranja después del segundo ciclo

Grupo funcional	Frecuencia (cm ⁻¹)
-C ≡ N Nitrilo	2310
Vibraciones de tensión -N=N-, compuestos azo	1584
Vibraciones de tensión S=O: Sulfonamidas	1151

Fuente: Wade, 2011.

En la gráfica 4 se muestran los espectros de infrarrojo del carbón activado de cáscara de naranja, desde su forma inicial, el primer ciclo en contacto con el agua residual textil y el segundo ciclo que se le dio.



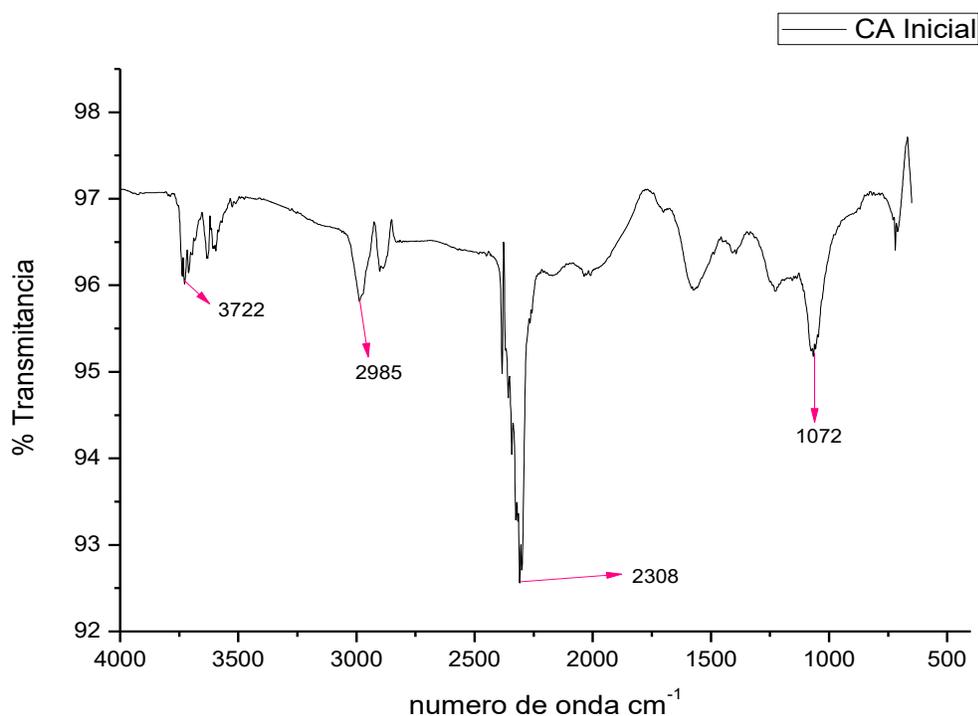
Gráfica 4 Espectros de IR del Carbón activado de la cáscara de naranja

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los espectros de infrarrojo del carbón activado y con Wade, 2011, el IR que muestra más vibraciones o son más notorias es el carbón activado inicial, el primer estiramiento del *O – H* a 3359 cm⁻¹ y su principal característica es que siempre es ancha. En los tres espectros destaca la zona aproximada de los 2300

cm^{-1} se encuentran los nitrilos $-\text{C} \equiv \text{N}$, y en el caso muy particular del IR del carbón activado del ciclo 2 muestra un grupo funcional en el número de onda 1584 cm^{-1} que son vibraciones de tensión $-\text{N} = \text{N}-$, con base en los colorantes que pueden estar presentes en el agua residual textil que se usó se pueden encontrar de la familia azoica. También en los tres espectros se encuentran grupos que pertenecen a compuestos de azufre, las vibraciones de tensión $\text{S} = \text{O}$, este en el rango de 1040 cm^{-1} y 1150 cm^{-1} .

En la gráfica 5 se muestra el espectro de infrarrojo del carbón activado a partir de cáscara de mandarina en su estado inicial, seguido de la tabla 7 con los grupos funcionales más representativos de este IR de acuerdo a su número de onda.



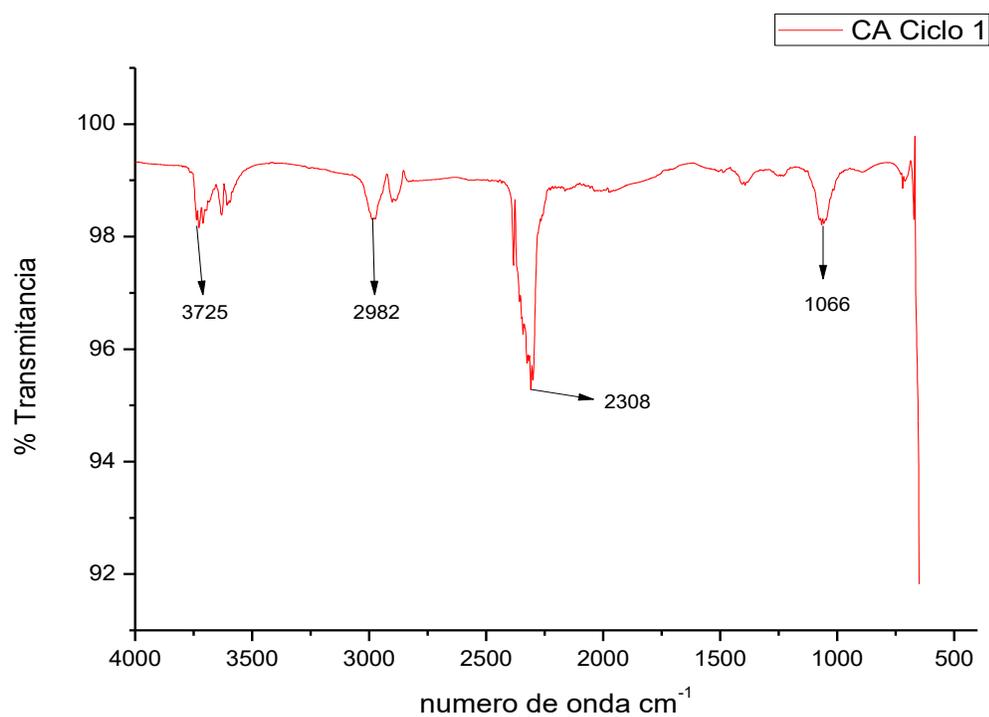
Gráfica 5 Espectro de IR del Carbón activado inicial de la cáscara de mandarina
Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de mandarina inicial

Grupo funcional	Frecuencia (cm ⁻¹)
<i>O – H Alcohol</i>	3722
<i>C – H Alcano</i>	2985
<i>–C ≡ N Nitrilo</i>	2308
Vibraciones de tensión S=O: Sulfóxidos	1072

Fuente: Wade, 2011

En la gráfica 6 se observa el espectro de IR del carbón activado a partir de cáscara de mandarina después del primer ciclo en contacto con el agua residual textil y en seguida en la tabla 8 se muestran las principales vibraciones de los grupos funcionales más representativos de la gráfica.



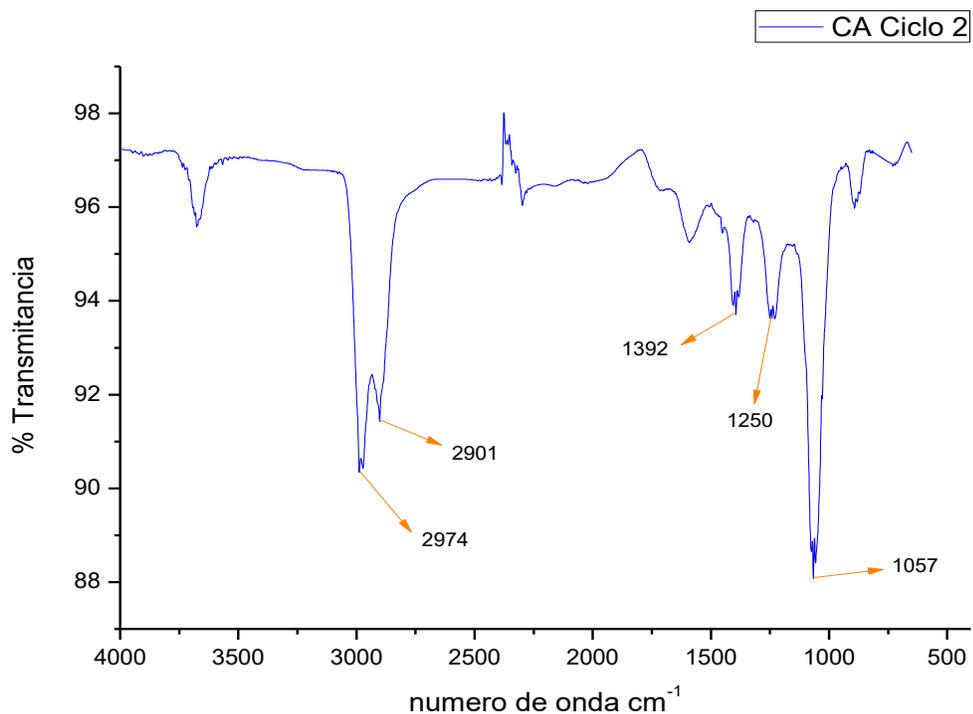
Gráfica 6 Espectro de IR del Carbón activado del ciclo 1 de cáscara de mandarina
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 8 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de mandarina después del primer ciclo

Grupo funcional	Frecuencia (cm ⁻¹)
<i>O – H Alcohol</i>	3725
<i>C – H Alcano</i>	2982
<i>–C ≡ N Nitrilo</i>	2308
Vibraciones de tensión S=O: ácidos sulfónicos	1066

Fuente: Wade, 2011

En la gráfica 7 se observa el espectro de IR del carbón activado a partir de cáscara de mandarina después del ciclo 2 y en la tabla 9 se muestran cuáles son los grupos funcionales más representativos de esta.



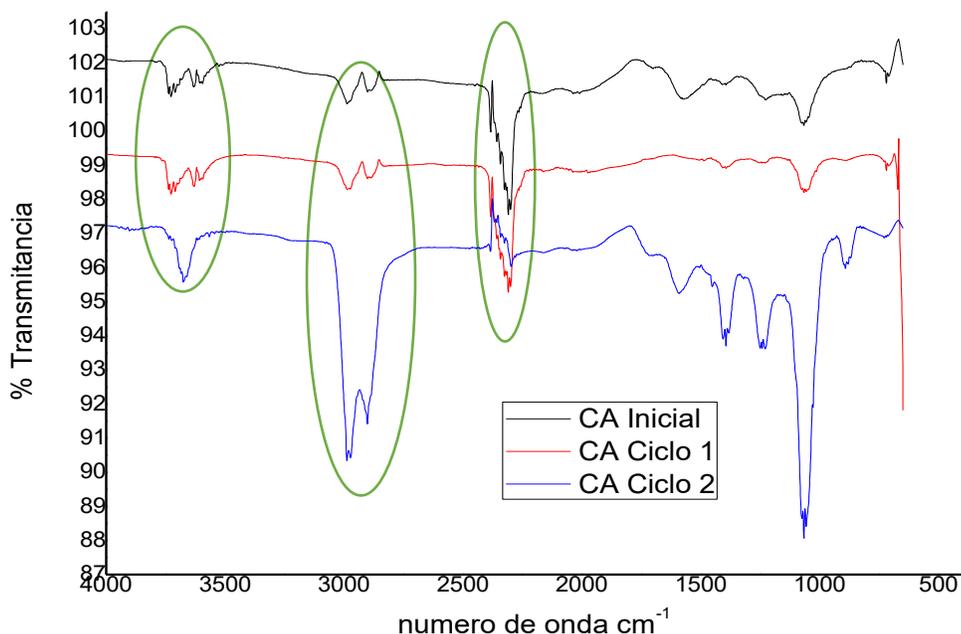
Gráfica 7 Espectro de IR del carbón activado del ciclo 2 de la cáscara de mandarina
 Fuente: Elaboración propia

Tabla 9 Frecuencias de estiramiento IR del carbón activado de cáscara de mandarina después del segundo ciclo

Grupo funcional	Frecuencia (cm ⁻¹)
<i>C – H Alcano</i>	2974
<i>C – H Alcano</i>	2901
Vibraciones de tensión <i>O – H</i> fenoles	1392
Vibraciones <i>C – N</i> aromáticas primarias	1250
Vibraciones de tensión S=O: ácidos sulfónicos	1057

Fuente: Wade, 2011

En la gráfica 8 se muestra la comparación de todos los espectros de IR del carbón activado a partir de cáscara de mandarina, desde su estado inicial hasta el segundo ciclo, esto es, en contacto con el agua residual textil.



Gráfica 8 Espectros de IR del carbón activado de la cáscara de mandarina

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los espectros que se muestran en la gráfica 8 del carbón activado a partir de cáscara de mandarina y con Wade, 2011, hay varias vibraciones notorias, los primeros picos son mayores a 3300 cm⁻¹ que son alcoholes *O – H*, después se

observan picos justo debajo de los 3000 cm^{-1} que son los alcanos $C - H$, otro pico de absorción está justo arriba de 2200 cm^{-1} que corresponde al grupo funcional nitrilo $-C \equiv N$, en el espectro del ciclo 2 se observa un pico en 1250 cm^{-1} que son vibraciones $C - N$ aromáticas primarias y en todos los espectros también hay vibraciones de tensión $S = O$.

En la tabla 10 se muestra un resumen de algunos resultados obtenidos a gran escala, para así tener una mejor comparativa de la eficiencia del carbón activado de cáscara de naranja y de mandarina respectivamente.

De acuerdo con Timur et al. (2006) en la activación química, el rendimiento y las propiedades del carbón activado van a depender de varios factores, como lo es: la impregnación (en este caso con H_3PO_4), la proporción y el tiempo que estuvo en contacto, así como de las condiciones de carbonización, como la temperatura de activación, la atmósfera de activación y la tasa de calentamiento. Estos factores varían de acuerdo con el precursor y el agente activador, en este trabajo se obtuvo un carbón activado final adecuado para la adsorción de colorantes como se muestra en la tabla 10.

Y aunque en varios estudios realizados, la temperatura de activación y el porcentaje de impregnación varía, después de cierta temperatura, el área superficial disminuye a medida que la temperatura aumenta. Las áreas superficiales más altas obtenidas por activación con H_3PO_4 se encuentran generalmente para temperaturas de activación inferiores a 600°C (Timur et al., 2006). Por lo que en este trabajo se espera que el área superficial de cada carbón obtenido sea alta debido a que se usó la temperatura de activación de 500°C .

Por otro lado, la influencia de la temperatura de carbonización en las áreas superficiales de los carbones activados depende de la proporción de impregnación y el agente activador. De acuerdo con Giris et al. (1994) activaron el bagazo de caña de azúcar con H_3PO_4 al 50% y observaron una disminución en el área superficial de 1105 a 973 y 780 m^2g^{-1} al aumentar el tiempo de remojo o activación de 1 a 3 y 10

horas. De igual forma Suárez et al. (2002) observaron una disminución en el área superficial al aumentar el remojo de 1 a 4 y 8 horas.

Y aunque no se cuenta con el área superficial del CAN y CAM, la temperatura (500°C) y el tiempo de activación que se emplearon (1 hora) fueron los adecuados para lograr obtener un carbón activado idóneo para la adsorción de colorantes.

Debido a que los carbones activados son los adsorbentes que día a día ganan más popularidad ya que son utilizados en el tratamiento de aguas residuales en todo el mundo, el CAN y CAM a pesar de tener una diferencia en el pH de las cáscaras como se describe en la tabla 3, esto no influyó en el número de lavados que se requirieron para cumplir con el procedimiento establecido. También se puede considerar que se obtiene un CA con mayor capacidad de adsorción a partir de residuos con alto contenido de celulosa y hemicelulosa. En este caso la cáscara de naranja presenta 3.3 % más de celulosa que la mandarina y 3.4 % de hemicelulosa, por lo que se tiene un mejor resultado de adsorción de colorantes en el carbón activado de cáscara de naranja (Tabla 3).

Una de las diferencias más notorias que se aprecian entre el CAN y CAM es capacidad de adsorción de los colorantes, ya que el tiempo que se muestra en la tabla y el resultado final del segundo ciclo, esto puede deberse a que la cáscara de naranja al presentar un grosor mayor que el de la mandarina, pueda presentar mayor número de poros y así adsorber más, ya que el CAM si tuvo capacidad de remover el color al 100% en el primer ciclo, pero ya no lo hizo en el segundo.

En cuanto a los espectros de IR de acuerdo con Torres et al., 2012 nos dice de manera general que los números de onda entre 2180-2500 cm^{-1} indica la presencia de estiramientos de triple enlace, como los grupos azo (-N=N-), enlace que es característico de los colorantes azoicos, estos se ven reflejados en las gráficas 4 y 8 a simple vista, pero de acuerdo con Wade específica al número de onda 1584 como se muestra en la gráfica 3, por lo que se puede decir que, ambos carbones activados pudieron adsorber colorantes azoicos.

Y aunque varios autores han utilizado el carbón activado de cáscara de naranja como adsorbente, ninguno lo utilizó para adsorber colorantes de aguas residuales textiles. Por ejemplo, Solís Fuentes et al. 2012 lo utilizó para la remoción del color del jugo de caña y este tuvo un rendimiento del 68.4%, Garzón y González, 2012 lo utilizó para la adsorción de Cr (VI) con rendimiento de 68.3% en comparación del carbón activado comercial que tiene un rendimiento del 83.05%, pero este puede ser utilizado sin ningún inconveniente y es más accesible (costo). También Marín Vásquez, 2019 utilizaron al carbón activado de cáscara de naranja para la adsorción de cloro y materia orgánica del agua, en este caso, se hizo una activación química con H_3PO_4 en tres diferentes concentraciones 26%, 50% y 80%, además de diferentes temperaturas 300, 380 y 400°C y un tiempo de 150, 180 y 240 min, siendo el de mejor rendimiento la de 80% de ácido fosfórico, en un tiempo de 150 min y una temperatura de 400°C ya que de acuerdo al proceso de impregnación hace que aumente el volumen del carbón y al mismo tiempo la adsorción del cloro; al final logró remover 100% de cloro. Por esto es por lo que el carbón activado de cáscara de naranja es un buen adsorbente y fue elegido para el presente trabajo, y ya que la mandarina pertenece a la misma familia de cítricos, fue una buena comparativa, además que se logró demostrar que también es un buen adsorbente.

Tabla 10 Resumen de resultados obtenidos

Carbón activado	Ciclo	Tiempo de remoción de colorantes	Eliminación de colorantes	Grupos funcionales	Frecuencia cm^{-1}
Naranja	Inicial	-		$O - H$ Alcohol $C - H$ Alcano $-C \equiv N$ Nitrilo $C = C$ Alqueno Alcoholes y fenoles: $O-H$ Alcoholes secundarios Vibraciones de tensión $S=O$: Sulfóxidos Compuesto halogenado $C-F$	3349 2980 2300 1645 1087 1044 880
	1	15 minutos		$O - H$ Alcohol $C - H$ Alcano $-C \equiv N$ Nitrilo Vibraciones de tensión $S=O$: Sulfóxidos	3700 2980 2303 1065
	2	No se tiene un tiempo con exactitud		$-C \equiv N$ Nitrilo Vibraciones de tensión $-N=N-$, compuestos azo Vibraciones de tensión $S=O$: Sulfonamidas	2310 1584 1151
	Inicial	-		$-H$ Alcohol $C - H$ Alcano $-C \equiv N$ Nitrilo Vibraciones de tensión $S=O$: Sulfóxidos	3722 2985 2308 1072
	1	2 horas		$-H$ Alcohol $C - H$ Alcano $-C \equiv N$ Nitrilo Vibraciones de tensión $S=O$: Sulfonamidas	3725 2982 2308 1066
	2	No se logro la remoción completa		$C - H$ Alcano $C - H$ Alcano Vibraciones de tensión $O - H$ fenoles Vibraciones $C - N$ aromáticas primarias Vibraciones de tensión $S=O$: ácidos sulfónicos	2974 2901 1392 1250 1057

Fuente: Wade 2011; Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La utilización de residuos agroindustriales como lo son la cáscara de naranja y mandarina para la preparación de carbón activado resulta una opción interesante por su disponibilidad, por su accesible precio, además que se le da un uso a un desecho, promoviendo de esta forma la economía circular.

Se logró obtener carbón activado de dos residuos orgánicos diferentes mediante el proceso de activación química. Las pruebas de adsorción se realizaron solo de manera visual, debido a la pandemia, pero a pesar de eso el carbón activado obtenido de cáscara de naranja como el de mandarina removieron por completo el color durante su primer ciclo, sin embargo, durante el segundo ciclo el más eficiente fue el de naranja, ya que volvió a remover por completo el color del agua residual textil, mientras que el carbón activado de cáscara de mandarina ya no lo hizo al cien por ciento. Y, con base en los espectros de infrarrojo realizados al carbón activado original y después de cada ciclo utilizado se notó un cambio significativo, en especial en la cáscara de naranja, además de observarse un grupo funcional en específico que se relaciona con los colorantes, especialmente de la familia azoica, como lo fue en el número de onda 1584 cm^{-1} que son vibraciones de tensión $-N = N -$.

Como se utilizó un agua residual textil real, no se sabe en específico que colorantes tiene y que otros contaminantes llegara a tener, pero aun así al analizar el carbón activado obtenido de residuos orgánicos, se concluye que permiten remover colorantes presentes en aguas residuales textiles.

La industria textil requiere la aplicación de procesos eficientes para la eliminación de colorantes en sus aguas residuales. La adsorción con carbón activado obtenido de residuos orgánicos representa una alternativa eficiente que reduciría el impacto negativo de sus descargas en los ecosistemas acuáticos.

Resultaría interesante hacer más pruebas al carbón activado, ya que se conservó, como lo podrían ser más ciclos para evaluar el rendimiento del carbón activado,

además de hacer las pruebas de adsorción con ayuda de las isotermas de adsorción y si es posible una regeneración al carbón activado, porque si lo vemos de esta forma, se volvería un nuevo desecho.

REFERENCIAS

- Báez Santana, S. A. (2019). *Evaluación de un material adsorbente compuesto de carbón activado en polvo termofijado en un material polimérico para tratar aguas residuales urbanas*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000785451&lang=es&site=eds-live>
- Balçık, E. Ü., Torun, M., & Nadeem, H. Ş. (2020). *GIDA ATIKLARINDAN AKTİF KARBON ÜRETİMİ VE AKTİF KARBONUN GIDA ENDÜSTRİSİNDE UYGULAMALARI. PRODUCTION OF ACTIVE CARBON FROM FOOD WASTES AND THE APPLICATIONS OF ACTIVE CARBON IN FOOD INDUSTRY.*, 45(2), 217–229.
<https://doi.org/10.0.59.133/gida.GD19127>
- Bhattacharyya, K. & Sarma, A. (2003). Adsorption characteristics of the dye, Brilliant Green, on Neem leaf powder. *Dyes and Pigments*, 57(3), 211-222. [https://doi.org/10.1016/s0143-7208\(03\)00009-3](https://doi.org/10.1016/s0143-7208(03)00009-3)
- Beltran-Pérez, O. D., Hormaza-Anaguano, A., Zuluaga-Diaz, B., & Cardona-Gallo, S. A. (2015). Structural modification of regenerated fuller earth and its application in the adsorption of anionic and cationic dyes / Modificación estructural de la tierra fuller regenerada y su aplicación en la adsorción de colorantes catiónicos y aniónicos. *DYNA*, 82(189), 165–171.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.42954>
- Bravo Jiménez, A. G. (2015). *Recuperación de ciclohexano adsorbido en carbón activado, aplicando un proceso de desorción*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2015/junio/0730715/0730715.pdf>
- Carneiro, P. A., Umbuzeiro, G. A., Oliveira, D. P., & Zanoni, M. V. B. (2010). Assessment of water contamination caused by a mutagenic textile effluent/dyehouse effluent bearing disperse dyes. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1), 694–699. <http://10.0.3.248/j.jhazmat.2009.09.106>
- Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 16. (1). 263-271.
<https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/882/1037>
- Castellar-Ortega, G., Mendoza C., E., Angulo M., E., Paula P., Z., Rosso B., M., y Jaramillo C., J. (2019). Equilibrio, cinética y termodinámica de la adsorción del colorante DB-86 sobre carbón activado de la cáscara de yuca. *Revista MVZ Córdoba*, 24(2), 7231–7238.
https://www.redalyc.org/journal/693/69360025021/69360025021_1.pdf

- Cerdá, E., & Khalilova, A. (2016). Economía circular. *Economía industrial*, 401(3), 11-20.
- Che Galicia, G. (2011) Remoción de un colorante de los efluentes de la industria textil mediante adsorción en una zeolita natural, Tesis de Maestría. UAM. México D.F.
<http://148.206.53.233/tesiuami/UAMI14885.pdf>
- CONAGUA (2010). *EL AGUA EN MÉXICO: CAUCES Y ENCAUCES*.
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>
- CONAGUA. (2015). Numeragua México, 2015.
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/NUMERAGUA2015.pdf>
- CONAGUA. (2018). *ESTADÍSTICAS DEL AGUA EN MÉXICO, EDICIÓN 2018*.
https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONAGUA. (2019). Plantas de Tratamiento de Agua Residual (nacional). Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Gerencia de Potabilización y Tratamiento.
<http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=plantasTratamiento>
- Cullers, R. L. (2020). Water pollution. In *Salem Press Encyclopedia*. Salem Press.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ers&AN=89474514&lang=es&site=eds-live>
- Doble, M. y Kumar, A. (2005). *Biotreatment of Industrial Effluents*. Butterworth-Heinemann.
- Domos Agua. (2018). *Reducción de colorantes de las Aguas Residuales en la Industria Textil*.
<https://www.domosagua.com/blog/reduccion-colorantes-aguas-residuales-industria-textil#:~:text=El%2070%25%20de%20los%20colorantes,al%2050%25%20de%20los%20vertidos.>
- Dos Santos, A.B., Cervantes, F.J., Van Lier, J.B. (2007). Review paper in current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology*. 98(12). 2369-2385. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.013>
- Durán Pilotzi, A. (2000). *Estudio de la influencia de la ozonación de lixiviados clarificados de rellenos sanitarios sobre su tratamiento con carbón activado asistido biológicamente*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000286653&lang=es&site=eds-live>
- Durán Pilotzi, A. (2003). *Evaluación del proceso de adsorción con minicolumnas de carbón activado (método RSSCT) para remover el 2-metilisorborneol (MIB) en aguas naturales*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000320924&lang=es&site=eds-live>

- Ensuncho, A. E., Robles, J. R. y Carriazo, J. G. (2015). Adsorción de colorante amarillo anaranjado en una solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Rev. Soc. Quím. Perú.* 81(2), 135-147.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2015000200006
- Espachs-Barroso, A., Soliva-Fortuny, R., & Martín-Belloso, O. (2005). A natural clouding agent from orange peels obtained using polygalacturonase and cellulase. *Food Chemistry*, 92(1), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.047>
- Erdem, C. U., Ateia, M., Liu, C. & Karanfil, T. (2020). *Activated carbon and organic matter characteristics impact the adsorption of DBP precursors when chlorine is added prior to GAC contactors.* *Water Research*, 184. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116146>
- Esquivel Martínez, A. S., & Martínez Tecanhuehue, C. I. (2019). *Estudio de prefactibilidad para la instalación y comercialización de una planta productora de un bioplástico a partir de cáscara de naranja.* Tesis Licenciatura. UNAM
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cot02029a&AN=tes.TES01000785432&lang=es&site=eds-live>
- Freundlich, H.M.F. (1906). Über die adsorption in lasungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57, 385-490.
- Frutas y Hortalizas. (2020). *NARANJA, CITRUS SINENSIS/RUTACEAE.* <https://www.frutas-hortalizas.com/Frutas/Presentacion-Naranja.html>
- Gaid K. (1981). *Modes d'élimination de composés sur filtres.* Thèse Docteur d'Etat, Université de Rennes 1B, 344, 200.
- Gamal, E. M., Mousa, H.A. El-Naas, M. H., Zacharia, R. & Judd, S. (2018). Bio-regeneration of activated carbon: A comprehensive review. *Separation and Purification Technology*, 197, 345-359. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.01.015>
- García López, R. A. y Granillo Oporta Y. A. (2017). Evaluación de las condiciones operacionales en el proceso de preparación de carbón activado de cáscara de naranja valencia (Citrus Sinensis Linn Osbeck). Tesis Licenciatura. UNAN.
<https://repositorio.unan.edu.ni/4275/1/96798.pdf>
- Garzón, S. J. A. y González L. L. A. (2012). Adsorción de Cr (VI) utilizando carbón activado a partir de cáscara de naranja. Tesis Licenciatura. Universidad de Cartagena.
<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/68/Adsorci%C3%B3n%20de%20Cr%20%28VI%29%20a%20partir%20de%20c%C3%A1scara%20de%20naranja%20y%20carb%C3%B3n%20activado%20obtenido%20de%20la%20misma%20%2819.12.12%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Girgis, B. S., Khalil, L. B., Tawfik, T. A. M. (1994). Activated Carbon from Sugar Cane Bagasse by Carbonization in the Presence of Inorganic Acids. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 61, 87-92

- Gómez, A., Rincón, S. y Wolfgang, K. (2010). Carbón activado de cuesco de palma: estudio de termogravimetría y estructura. Departamento de Ingeniería y Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Kassel University Press. pp.1-2
- Gupta, V. K., & Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, 90(8), 2313–2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Gutiérrez Suárez, K. (2008). Remoción de cianotoxinas en agua clarificada por medio de carbón activado. Tesis d Licenciatura. UNAM
<http://132.248.9.195/ptd2008/agosto/0630287/0630287.pdf>
- Hayashi, J., Kazehaya, A., Muroyama, K., & Watkinson, A. P. (2000). *Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. Carbon (New York, NY)*, 38(13), 1873–1878. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00027-0)
- Hunger, K. (2003). *Industrial dyes: Chemistry, properties, applications*. Wiley-VCH, Weinheim. Alemania.
- Jiménez Cruz F. (1988). *Preparación de carbón activado*. Tesis de Ingeniero Químico. F.Q., UNAM.
- Langmuir, I. (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, (40)9. 1361-1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- López Reyes, A. Y. (2010). *Aplicación del proceso de adsorción con carbón activado para remover compuestos orgánicos del agua de la Planta Potabilizadora Madín, Estado de México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02029a&AN=tes.TES01000657256&lang=es&site=eds-live>
- Maldhure, A. V., & Ekhe, J. D. (2011). Preparation and characterizations of microwave assisted activated carbons from industrial waste lignin for Cu(II) sorption. *Chemical Engineering Journal*, 168(3), 1103–1111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.01.091>
- Manals Cutiño, E. M., Vendrell Calzadilla, F., & Penedo Medina, M. (2016). *Aplicación de carbón activado de cascarón de coco en adsorción de especies metálicas contenidas en el licor de desecho (WL) de la lixiviación ácida de mineral laterítico / Application of Activated Carbon of Coconut shell in Adsorption of Metal species Contained in Waste liquor (WL) Acid leaching of Lateritic Mineral. Tecnología Química*, 36(1), 93–103.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edssci&AN=edssci.S2224.61852016000100009&lang=es&site=eds-live>
- Marín Vásquez, J. A. (2019). Obtención de carbón activado a partir de cáscara de naranja por método de activación química para la adsorción de cloro y materia orgánica del agua, en la provincia de Jaén. Trabajo de investigación. Universidad de Lambayeque.
<http://repositorio.udl.edu.pe/handle/UDL/242>

- Marcano, D. (2018). *Introducción a la Química de los colorantes. Colección Divulgación Científica y Tecnológica*. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela. 254 p.
<http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/19390/1/colorantes%20listo%20%2Bisbn.pdf>
- Marsh, H., & Rodríguez-Reinoso, F. (2006). *Activated carbon*. Elsevier.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catt02025a&AN=lib.MX001001865021&lang=es&site=eds-live>
- Martín, M. (7 noviembre del 2011). Tratamiento de Depuración de Aguas II: Tratamientos Convencionales. Técnico Ambiental en Reciclaje.
<http://tecnicoambientalenreciclaje.blogspot.com/>
- McGuire J. y Suffet H. (1978). *Adsorption of organic from domestic wáter supplies. JAWWA, Ater Technology Quality, 11*, pp 621-636. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1978.tb04257.x>
- Menéndez-Díaz, J. A., & Martín-Gullón, I. (2006). Chapter 1 Types of carbon adsorbents and their production. *Interface Science and Technology, 7*(Activated Carbon Surfaces in Environmental Remediation), 1-47. [http://10.0.3.248/S1573-4285\(06\)80010-4](http://10.0.3.248/S1573-4285(06)80010-4)
- Metcalf & Eddy (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Mc Graw-Hill.
- Montes Rojas R. (2000). *Estudio de los procesos avanzados de ozonización y adsorción con carbón activado para la potabilización de agua*. Tesis de Licenciatura, F.Q., UNAM.
- Morales Apaza, D. N., Condori Choque, A. & Torrez Torrez, D. A. (2021). Aplicación de la Economía Circular mediante el aprovechamiento máximo de la Piña (Ananas comosus). *Revista Acta Nova, 10*(1), 42-60.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892021000100004&lng=es&tlng=es.
- Mukherjee, S., Kumar, S., Misra, A. K., & Fan, M. (2007). Removal of phenols from water environment by activated carbon, bagasse ash and wood charcoal. *Chemical Engineering Journal, 129*(1), 133-142. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.10.030>
- Najm I., Snoeyink V., Lykins B. y Adams J. (1991). Using powdered activated carbon: a critical review. *JAWWA 82*(1), 65-72.
- Noriega Astorga, A. L. (2020). *Adsorción de As(V) por hematita y carbón activado desde una solución acuosa*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
<http://pbidi.unam.mx:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=catt02029a&AN=tes.TES01000800993&lang=es&site=eds-live>
- Norma Oficial Mexicana 001 SEMARNAT (1996). Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAA-15-13.pdf>

- Ogugbue, C. J., & Sawidis, T. (2011). Bioremediation and Detoxification of Synthetic Wastewater Containing Triarylmethane Dyes by *Aeromonas hydrophila* Isolated from Industrial Effluent. *Biotechnology Research International*, 1-11. <https://doi.org/10.4061/2011/967925>
- O'Neill, C., Hawkes, F.R., Hawkes, D.L., Lourenco, N.D., Pinheiro, H.M., Delée, W. (1999). Colour in textile effluents-sources, measurement, discharge contents, and simulation: A review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 17. 1009-1019. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199911\)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199911)74:11<1009::AID-JCTB153>3.0.CO;2-N)
- Peña, H. K. J., Giraldo, L. y Moreno, J. C. (2012). Preparación de carbón activado a partir de cascara de naranja por activación química, caracterización física y química. *Revista Colombiana de Química*. 41(2). 311-323. https://www.researchgate.net/publication/264052563_PREPARACION_DE_CARBON_ACTIVADO_A_PARTIR_DE_CASCARA_DE_NARANJA_POR_ACTIVACION_QUIMICA_CARACTERIZACION_FISICA_Y_QUIMICA
- Quiñones, L. (24 de julio de 2018). Los bosques se pasean por las pasarelas de la moda. *Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2018/07/1438312>
- Rincón, A.M., Vásquez, A. M, Padilla, F.C. (2005). Composición química y compuestos bioactivos de las harinas de cáscaras de naranja (*citrus sinensis*), mandarina (*citrus reticulata*) y toronja (*citrus paradisi*) cultivadas en Venezuela. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 55(3). 305-310 http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222005000300013
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247-255. [https://doi.org/10.1016/s0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/s0960-8524(00)00080-8)
- SAA/ED (Secretariado Alianza por el Agua/Ecología y Desarrollo). (2014). Manual de Depuración de Aguas Residuales Urbanas. *MONOGRÁFICOS AGUA EN CENTROAMERICA*. <https://agua.org.mx/biblioteca/manual-de-depuracion-de-aguas-residuales-urbanas>
- SAGARPA. (2016). *CITRICOS LIMÓN, NARANJA Y TORONJA*. *Mexicanos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257073/Potencial-C_tricos-parte_uno.pdf
- SAGARPA. (2017). México, quinto productor mundial de naranja. <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-quinto-productor-mundial-de-naranja>
- SAGARPA. (2020). Mandarina: cítrico que comienza en otoño. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mandarina-citrico-que-comienza-en-otono?idiom=es>
- Shafeeyan, M. S., Daud, W. M. A. W., Houshmand, A., & Shamiri, A. (2010). A review on surface modification of activated carbon for carbon dioxide adsorption. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89(2), 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2010.07.006>
- SEMARNAT. (2006). Gestión ambiental en México. Distrito Federal: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- SEMARNAT. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/index.html
- SEMARNAT. (2016). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Claves, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde.
https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., Crouch, S. R. (2005). Fundamentos de Química Analítica, octava edición. Thomsom
- Solís Fuentes, J.A., Morales Téllez, M., Ayala Tirado, R.C. y Durán de Bazúa, M.C. (2012). Obtención de carbón activado a partir d e residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Tecnol.Ciencia Ed.*27(1), 36-48.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48224413006>
- Suárez García, F., Martínez Alonso, A. y Tascón, J. M. D. (2002). Pyrolysis of apple Pulp: Chemical Activation with phosphoric acid. *J Anal Appl Pyrol* 63, 283-301.
- Tadda, M. A., Ahsan, A., Shitu, A., Elsergany, M., Thirugnanasambantham, A., Jose, B., Norsyahariati, N. (2016). A review on activated carbon: process, application and prospects. *Journal of Advanced Civil Engineering Practice and Research.* 2, 7–13.
https://www.researchgate.net/publication/318827940_A_review_on_activated_carbon_process_application_and_prospects
- Tejeda, B. L., Marimón, W. y Medina, M. (2014). *Evaluación del potencial de las cáscaras de frutas en la obtención de bioetanol. Hechos Microbiológicos.* 5(1), 4-9.
<https://revistas.udea.edu.co/index.php/hm/article/view/323244>
- Timur, S., Cem, I. K., Ikizoglu, E. & Yanik, J. (2006). *Preparation of Activated Carbons from Oreganum Stalks by Chemical Activation. Energy & Fuels.* 20, 2636-2641.
<https://doi.org/10.1021/ef060219k>
- Torres, J., Gerente, C. y Andres, Y. (2012). Conversion of agricultural residues into activated carbons for wáter purification. Application to arsenate removal. *J. Environ. Sci. Health A.*, 47(8), 1173-1185. <http://doi.org/10.1080/10934529.2012.668390>
- Valenzuela Padilla, A. A. y Torres Pérez, J. (2020). Remoción de colorantes azoicos (A5 y R40) con carbón activado de cáscara de nuez. *Ing. Invest. Y tecnol.* 21(3)
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.027>
- Volesky, B. (2003). Sorption and biosorption. St. Lambert, Québec: *BV Sorbex*.
- Wade, L. (2011). *Química orgánica. Volumen 1.* Pearson
- Zaruma Arias, P.E., Proal Nájera, J.B., Chaires Hernández, I., Salas Ayala. H. I. (2018). Textile Industrial Dyes and optimal wastewater effluents treatments: A short review. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas.* 19, ISSN: 1390-1869.

Apéndice 1 IR: Absorciones infrarrojas características de los grupos funcionales

A. Cromóforos hidrocarbonados			B. Cromóforos carbonílicos		
Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)	Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)
1. Tensión C – H			1. Vibraciones de tensión de cetonas		
a. Alcano	m-s	2962-2853	a. Saturadas, acíclicas	s	1725-1705
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	y m	3040-3010 3095-3075	b. Saturadas, cíclicas: Anillo con 6 miembros (y mayores)	s	1725-1705
Alqueno, disustituido, cis	m	3040-3010	Anillo de 5 miembros	s	1750-1740
Alqueno, disustituido, trans	m	3040-3010	Anillo de 4 miembros	s	~1775
Alqueno, disustituido, gem	m	3095-3075	c. $\alpha\beta$ -Insaturadas, acíclicas	s	1685-1665
Alqueno, trisustituido	m	3040-3010	d. $\alpha\beta$ -Insaturadas, cíclicas: Anillo con 6 miembros (y mayores)	s	1685-1665
c. Alquino	s	~3300	Anillo con 5 miembros	s	1725-1708
d. Aromático	v	~3030	e. $\alpha\beta, \alpha'\beta'$ -Insaturadas, acíclicas	s	1670-1663
2. Enlace C – H			f. Arililo	s	1700-1680
a. Alcano, C – H	w	~1340	g. Diarilo	s	1670-1660
Alcano, –CH ₂ –	m	1485-1445	h. β -Dicetonas	s	1730-1710
Alcano, –CH ₃	m	1470-1430	i. β -Dicetonas (enólicas)	s	1640-1540
	y s	1380-1370	j. 1,4-Quinonas	s	1690-1660
Alcano, gem-dimetilo	s	1385-1380	k. Cetenas	s	~2150
	y s	1370-1365	2. Aldehídos		
Alcano, ter-butilo	m	1395-1385	a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo:		
	y s	~1365	Saturados, alifáticos	s	1740-1720
b. Alqueno, monosustituido (vinilo)	s	995-985	α, β -Insaturados, alifáticos	s	1705-1680
	s	915-905	$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ -Insaturados, alifático	s	1680-1660
	y s	1420-1410	Arilo	s	1715-1695
Alqueno, disustituido, cis	s	~690	b. Vibraciones de tensión C – H.		
Alqueno, disustituido, trans	s	970-960	dos bandas	w	2900-2820
	y m	1310-1295		y w	2775-2700
Alqueno, disustituido, gem	s	895-885	3. Vibraciones de tensión de ésteres		
	y s	1420-1410	a. Saturados, acíclicos	s	1750-1735
Alqueno, trisustituido	s	840-790	b. Saturados, cíclicos: δ -Lactonas (y anillos grandes)	s	1750-1735
c. Alquino	s	~630	γ -Lactonas	s	1780-1760
d. Aromático: tipo de sustitución ^b :			β -Lactonas	s	~1820
Cinco átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	c. Insaturados:		
Cuatro átomos de hidrógeno adyacentes	y v, s	~700	Tipo éster vinílico	s	1800-1770
Tres átomos de hidrógeno adyacentes	v, s	~750	α, β -Insaturados y arilo	s	1730-1717
Dos átomos de hidrógeno adyacentes	v, m	~780	α, β -Insaturados, δ -lactona	s	1730-1717
Un átomo de hidrógeno	v, m	~830	α, β -Insaturados, γ -lactona	s	1760-1740
3. Tensión de enlaces múltiples C – C			β, γ -Insaturados, γ -lactona	s	~1800
a. Alqueno, no conjugado	v	1680-1620	d. α -Cetoésteres	s	1755-1740
Alqueno, monosustituido (vinilo)	m	~1645	e. β -Cetoésteres (enólicos)	s	~1650
Alqueno disustituido, cis	m	~1658	f. Carbonatos	s	1780-1740
Alqueno disustituido, trans	m	~1675	g. Tioésteres	s	~1690
Alqueno disustituido, gem	m	~1653	4. Ácidos carboxílicos		
Alqueno, trisustituido	m	~1669	a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo		
Alqueno, tetrasustituido	w	~1669	Saturados alifáticos	s	1725-1700
Dieno	w	~1650	α, β -Insaturados alifáticos	s	1715-1690
	y w	~1600	Arilo	s	1700-1680
b. Alquino, monosustituido	m	2140-2100	b. Tensión del grupo hidroxilo (enlazado), varias bandas	w	2700-2500
Alquino, disustituido	v, w	2260-2190	c. Tensión del anión carboxilo	s	1610-1550
c. Aleno	m	~1960		y s	1400-1300
	y m	~1060	5. Vibraciones de tensión de anhídridos		
d. Aromático	v	~1600	a. Saturados, acíclicos	s	1850-1800
	v	~1580		y s	1790-1740
	m	~1500			
	y m	~1450			

Apéndice 1 (Continuación)

Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)	Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)
b. α, β -Insaturados y arilo, anhídridos acíclicos	s y s	1830-1780 1770-1720	$O - H$ enlazado a hidrógeno de manera (intermolecular (cambio en la dilución)		
c. Saturados, anhídridos con anillo de 5 miembros	s y s	1870-1820 1800-1750	Compuesto de puente simple	v, sh s, b	3550-3450 3400-3200
d. α, β -Insaturados anillo de 5 miembros	s y s	1850-1800 1830-1780	Asociación polimérica		
6. Vibraciones de tensión de haluros de acilo			Enlazado a hidrógeno de manera intra-molecular (no hay cambio en la dilución)		
a. Fluoruros de acilo	s	~1850	Compuestos de puente simple	v, sh	3570-3450
b. Cloruros de acilo	s	~1795	Compuestos quelato	w, b	3200-2500
c. Bromuros de acilo	s	~1810	b. Vibraciones de torsión de $O - H$ y tensión $C - O$:		
d. α, β -Insaturados y arilo	s y m	1780-1750 1750-1720	Alcoholes primarios	s y s	~ 1050 1350-1260
7. Amidas			Alcoholes secundarios	s	~1100
a. Vibraciones de tensión del grupo carbonilo			Alcoholes terciarios	y s	1350-1260
Primarias, sólido y disol. concentrada	s	~1650	Fenoles	s y s	~1150 1410-1310
Primarias, disolución diluida	s	~1690		s	~1200
Secundarias, sólidos y disolución concentrada	s	1680-1630	2. Aminas	y s	1410-1310
Secundarias, disolución diluida	s	1700-1670	a. Vibraciones de tensión $N - H$:		
Terciarias, sólido y todas las disoluciones	s	1670-1630	Primarias, libres; dos bandas	m y m	~3500 ~3400
Cíclicas, δ -lactamas	s	~1680	Secundarias, libres; una banda	m	3500-3310
Cíclicas, γ -lactamas	s	~1700	Iminas (= $N - N$); una banda	m	3400-3300
Cíclicas, γ -lactamas, fusionadas con otro anillo	s	1750-1700	Sales de aminas	m	3130-3030
Cíclicas, β -lactamas	s	1760-1730	b. Vibraciones de torsión $N - H$:		
Cíclicas, β -lactamas, fusionadas con otro anillo, disolución diluida	s	1780-1770	Primarias	s-m	1650-1590
Ureas, acíclicas	s	~1660	Secundarias	w	1650-1550
Ureas, cíclicas, anillo de 6 miembros	s	~1640	Sales de aminas	s y s	1600-1575 ~1500
Ureas, cíclicas, anillo de 5 miembros	s	~1720	c. Vibraciones $C - N$:		
Uretanos	s	1740-1690	Aromáticas, primarias	s	1340-1250
Imidas, acíclicas	s y s	~1710 ~1700	Aromáticas, secundarias	s	1350-1280
Imidas, cíclicas,	s	~1710	Aromáticas, terciarias	s	1360-1310
Anillo de 6 miembros	y s	1700	Alifáticas	w y w	1220-1020 ~1410
Imidas, cíclicas, α, β -insaturadas	s	~1730	3. Compuestos de nitrógeno insaturados		
Anillo de 6 miembros	y s	~1670	a. Vibraciones de tensión $C \equiv N$:		
Imidas, cíclicas, anillo con 5 miembros	s y s	~1770 ~1700	Nitrilos de alquilo	m	2260-2240
Imidas, cíclicas, α, β -insaturadas	s	~1790	Nitrilos de alquilo α, β -insaturados	m	2235-2215
Anillo de 5 miembros	y s	~1710	Nitrilo de arilo	m	2240-2220
b. Vibraciones de tensión $N - H$:			Isocianatos	m	2275-2240
Primarias, libres; dos bandas	m y m	~3500 ~3400	Isocianuros	m	2220-2270
Primarias, enlazadas: dos bandas	m y m	~3350 ~3180	b. $> C = N -$ Vibraciones de tensión		
Secundarias, libres; una banda	m	~3430	Vibraciones de tensión (iminas, oximas)		
Secundarias, enlazadas; una banda	m	3320-3140	Compuestos de alquilo	v	1690-1640
c. Vibraciones de torsión $N - H$:			Compuestos α, β -insaturados	v	1660-1630
Amidas primarias, disolución diluida	s	1620-1590	c. Vibraciones de tensión $-N = N -$, compuestos azo	v	1630-1575
Amidas secundarias	s	1550-1510	d. Vibraciones de tensión $-N = C = N -$, diimida	s	2155-2130
C. Grupos cromóforos misceláneos			e. Vibraciones de tensión $-N_3$, azidas	s y w	2160-2120 1340-1180
1. Alcohol y fenoles			f. Compuestos nitro $C - NO_2$,		
a. Vibraciones de tensión $O - H$: $O - H$ libre	v, sh	3650-3590	g. Aromáticos	s	1570-1500

Apéndice 1 (Continuación)

Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)	Grupo	Intensidad ^a	Intervalo (cm ⁻¹)
(Compuestos nitro aromáticos)	y s	1370-1300	b. Vibraciones de tensión C = S	s	1200-1050
Alifáticos	s	1570-1550	c. Vibraciones de tensión S = O:		
	y s	1380-1370	Sulfóxidos	s	1070-1030
h. O – NO ₂ , nitratos	s	1650-1600	Sulfonas	s	1160-1140
	y s	1300-1250		y s	1350-1300
i. C – NO, compuesto nitroso	s	1600-1500	Sulfitos	s	1230-1150
j. O – NO, nitritos	s	1680-1650		y s	1430-1350
	y s	1625-1610	Cloruros de sulfonilo	s	1185-1165
4. Compuestos halogenados vibraciones de tensión C – X				y s	1370-1340
a. C – F	s	1400-1000	Sulfonamidas	s	1180-1140
b. C – Cl	s	800-600		y s	1350-1300
c. C – Br	s	600-500	Ácidos sulfónicos	s	1210-1150
d. C – I	s	~500		s	1060-1030
5. Compuestos con azufre				y s	~650
a. Vibraciones de tensión S – H	w	2600-2550	Tioésteres (C = O)S	s	1690

^a Abreviaciones: f = fuerte, m = medio, d = débil, v = variable, a = amplio, in = intenso, ~ = aproximado

^b Los bencenos sustituidos también muestran bandas débiles en la región de 200-1670 cm⁻¹

Anexo

1. Proceso cáscara de naranja

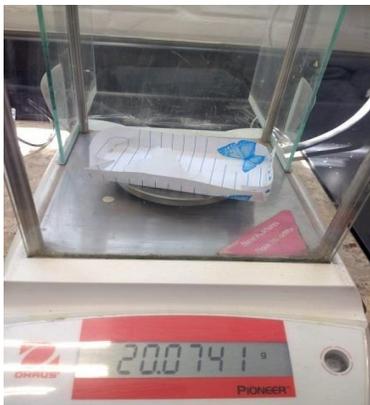


Fig. A1 Muestra de H_3PO_4



Fig. A2 Muestra de cáscara de naranja.

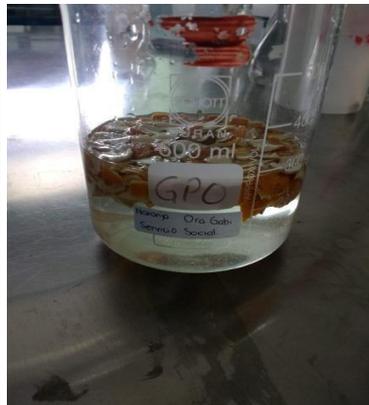


Fig. A3 Muestra con 250 ml de solución.



Fig. A4 Muestra a 70°C



Fig. A5 Muestra sin exceso de la solución



Fig. A6 Muestra en la mufla



Fig. A7 Muestra calcinada



Fig. A8 Primer lavado



Fig. A9 Primer lavado



Fig. A10 pH 4 después del primer lavado



Fig. A11 Segundo lavado



Fig. A12 pH 4 después del segundo lavado



Fig. A13 y A14 Tercer lavado



Fig. A15 pH 4 después del tercer lavado



Fig. A16 y A17 Cuarto lavado, pH 4



Fig. A18 y A19 Quinto lavado, pH 4.5



Fig. A20 y A21 Sexto lavado pH 5



Fig. A22 y A23 Filtrado



Fig. A24 Muestra en la estufa a 105°C por 2 h



Fig. A25 Peso de la muestra seca

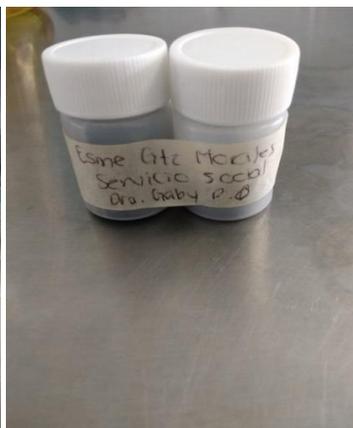


Fig. A26 Muestra etiquetada

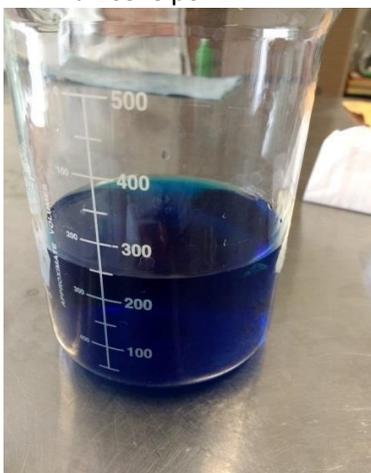


Fig. A27 250ml de solución acuosa coloreada



Fig. A28 Agregar 2 g de CAN

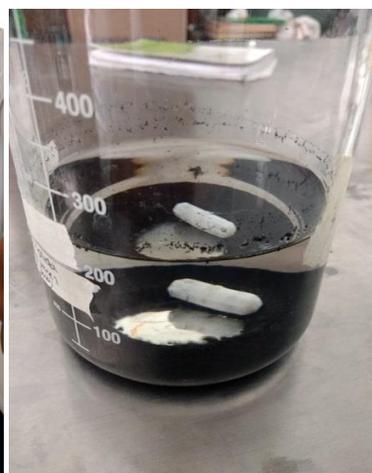


Fig. A29 Agua después de 24 h en agitación



Fig. A29 Segundo ciclo

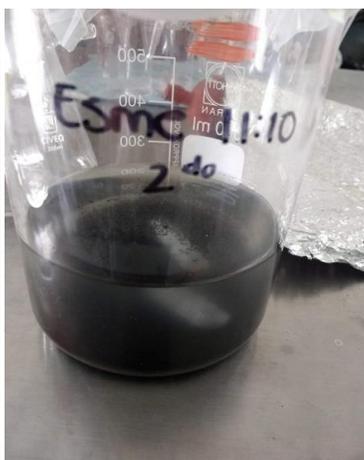


Fig. A30 Segundo ciclo después de 24 h



Fig. A31 Filtración del CAN

2. Proceso de la cáscara de mandarina



Fig. A1 Solución de H_3PO_4 al 20%



Fig. A2 Muestra seca de cáscara de mandarina



Fig. A3 Muestra con 250 ml de solución



Fig. A4 Muestras a 70°C



Fig. A5 y A6 Muestras sin exceso de solución de H_3PO_4



Fig. A6 Muestra en la mufla



Fig. A7 Muestra calcinada



Fig. A8 Primer lavado



Fig. A9 pH 3 después del primer lavado



Fig. A10 segundo lavado



Fig. A11 pH 3.5 después del segundo lavado



Fig. 12 Tercer lavado



Fig. 13 pH después del tercer lavados



Fig. 14 pH después del cuarto lavado

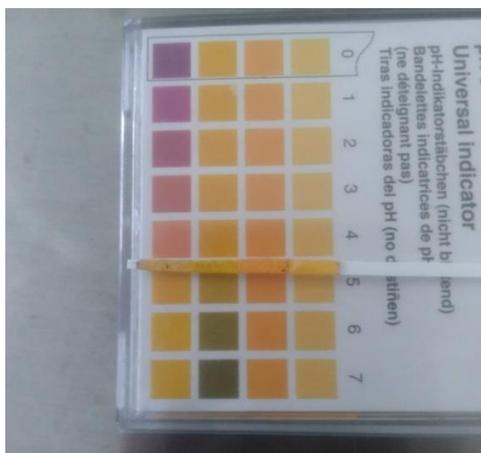


Fig. A15 pH 4.5 después del quinto lavado



Fig. A16 pH 5 después del sexto lavado



Fig. A17 CA guardado



Fig. A18 Agua residual real



Fig. A19 250 ml de agua residual más 2g de CAM



Fig. A20 CA adsorbiendo el color del agua residual



Fig. A21 Agua residual después de 24 h con el CAM



Fig. A22 Filtración del agua después del ciclo 1



Fig. A23 Ciclo 2 del CA en una nueva muestra de agua residual



Fig. A24 Agua residual después de 24 h con el CAM