

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DEL USO DE LA BORRA DE CAFÉ PARA
LA REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS EN EL AGUA**

**MARÍA CAMILA GUTIÉRREZ ROJAS
DANIELA CERÓN BARRETO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD DEL USO DE LA BORRA DE CAFÉ PARA
LA REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS EN EL AGUA**

**MARÍA CAMILA GUTIÉRREZ ROJAS
DANIELA CERÓN BARRETO**

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director,
JAIME PLAZAS TUTTLE
Ingeniero Civil, M.Sc., M.S., Ph.D.**

**Codirector,
FELIPE CORREA MAHECHA
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2020**

Nota de aceptación:

Ing. Claudio Alberto Moreno Arias

Ing. Juan Camilo Cely Garzón

Bogotá D.C., agosto de 2020

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Iván Ramírez Marín

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

“Se firme en tus actitudes y perseverante en tu ideal. Pero sé paciente, no pretendiendo que todo llegue de inmediato. Haz tiempo para todo, y todo lo que es tuyo, vendrá a tus manos en el momento oportuno”

M. Gandhi

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por permitirme obtener un logro más en mi vida. A mis padres y mi tía quienes siempre han sido y serán los interpretes de cada una de las victorias que he obtenido. Igualmente agradezco a mis familiares por su apoyo incondicional, a mi compañera de trabajo por su dedicación y esfuerzo en la travesía de este trabajo. Finalmente y no menos importante a mis amigos que me acompañaron a lo largo de esta bonita experiencia que no cambiaría nunca en mi vida.

María Camila Gutiérrez Rojas

En primera instancia, dedico este trabajo de grado a Dios por guiarme en cada momento de mi vida. A las dos personas más importantes en mi vida, mis padres Sonia Barreto y Alexander Cerón, quienes con su constante apoyo, palabras alentadoras y esfuerzos hicieron posible este logro.

Asimismo dedico este trabajo a mis amigos, personas que conocí a lo largo de este camino y con quienes compartí momentos inolvidables y todo lo que implica la universidad. A Nicolás Galindo, por su apoyo incondicional durante todos los semestres y particularmente durante el desarrollo del trabajo de grado.

Finalmente, a mi compañera Camila, por su compromiso, dedicación y por darme la oportunidad de trabajar con ella.

Daniela Cerón Barreto

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios y a nuestras familias por guiarnos en este camino, alentarnos en los momentos difíciles y apoyarnos de forma incondicional en cada momento.

Agradecimientos especiales.

Al director del proyecto, el ingeniero Jaime Plazas Tuttle, por darnos la oportunidad de orientarnos, apoyarnos y aconsejarnos durante el desarrollo de este proyecto.

Al codirector del proyecto, el ingeniero Felipe Correa, por su tiempo, acompañamiento y transmisión de conocimientos necesarios en el estudio.

Al orientador del proyecto, el ingeniero Fernando Moreno, por asesorarnos y aconsejarnos en la trayectoria de la investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	25
1. MARCO DE REFERENCIA	26
1.1 CONTAMINACIÓN HÍDRICA	26
1.1.1 Fuentes naturales	26
1.1.2 Fuentes antropogénicas	27
1.2 COLORANTES	27
1.2.1 Colorantes naturales.	28
1.2.2 Colorantes sintéticos.	28
1.2.2.1 Colorantes Azoicos.	28
1.2.2.2 Colorantes de Antraquinona.	30
1.2.2.3 Colorantes de Trifenilmetano	31
1.3 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS COLORANTES EN EL AGUA	32
1.4 MÉTODOS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON COLORANTES	33
1.5 BIOSORCIÓN	37
1.6 BORRA DE CAFÉ	37
2. ESTADO DEL ARTE DE LA BORRA DE CAFÉ PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS EN EL AGUA	40
2.1 INVESTIGACIONES RELEVANTES	40
2.2 REMOCIÓN DE COLORANTES BÁSICOS	41
2.3 REMOCIÓN DE COLORANTES ÁCIDOS	43
2.4 REMOCIÓN DE COLORANTES REACTIVOS	44
2.5 BORRA DE CAFÉ MODIFICADA PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES	44

3. METODOLOGÍAS USADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ	51
3.1 PUNTO DE CARGA CERO	51
3.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	55
3.3 BRUNAUER-EMMETT-TELLER	62
3.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER	70
4. VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS	80
4.1 PRETRATAMIENTO	80
4.2 MODIFICACIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ	82
4.2.1 Tratamiento alcalino.	83
4.2.2 Tratamiento ácido.	84
4.2.3 Activación con microondas.	86
4.2.4 Modificación magnética.	87
4.2.5 Biosorbentes compuestos.	88
4.3 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE BIOSORCIÓN	89
4.3.1 pH.	90
4.3.2 Concentración del colorante.	93
4.3.3 Dosis de biosorbente.	99
4.3.4 Tiempo de contacto.	101
4.3.5 Tamaño de partícula.	104
4.3.6 Temperatura.	106
4.4 APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA BORRA DE CAFÉ	110
5. CONCLUSIONES	112
6. RECOMENDACIONES	113

BIBLIOGRAFÍA	114
ANEXOS	128

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estructura química del colorante Amarillo Anaranjado	29
Figura 2. Estructura química del colorante Rojo de Alizarina	31
Figura 3. Estructura química del colorante Azul Brillante FCF	31
Figura 4. Estructura química del colorante Azul Directo 199	32
Figura 5. Investigaciones por año sobre la BC	40
Figura 6. Tendencia de las metodologías usadas para la caracterización de la BC, PCC (Punto de carga cero), Boehm (Titulación ácido base por el método de Boehm), SEM (microscopía electrónica de barrido), BET (isotermas de biosorción de Brunauer, Emmett y Teller), FTIR (espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier), TGA (Análisis termogravimétrico) y XRD (Difracción de rayos X)	51
Figura 7. Determinación del PCC para la BC	54
Figura 8. Micrografía SEM de la BC	56
Figura 9. Micrografías SEM de la BC (a) antes y (b) después del proceso de biosorción del colorante AM	57
Figura 10. Micrografías SEM de la BC (a) antes y (b) después del proceso de biosorción del colorante CV	58
Figura 11. Micrografías SEM de la BC lavada con agua destilada (a, b) y con soluciones acuosas de 0,1N NaOH y HCl (c, d)	58
Figura 12. Micrografías SEM de la BC modificada con polipirrol a diferentes aumentos	59
Figura 13. Micrografías SEM de la BC en (a) 300x y (b) 1500x, compuesto de BC con polietilenimina en (c) 300x y (d) 1500x y partículas extrañas en (e) la BC y (f) compuesto de BC y polietilenimina	60
Figura 14. Micrografías SEM del compuesto de quitosano/BC antes (a) y después (b) del proceso de biosorción del colorante rojo reactivo 152	61
Figura 15. Micrografías SEM de la BC con 30%(b) y BC con 180%(c) de H ₃ PO ₄	61
Figura 16. Micrografías SEM del CA derivado de la BC modificada con KOH	62
Figura 17. Isotermas de biosorción según la clasificación IUPAC	63
Figura 18. Clasificación de los poros establecida por la IUPAC	64
Figura 19. Isotermas de biosorción BET para el CA comercial (♦) y la BC modificada con 30%(▼), 60%(▲), 120% (■) y 180%(●) de H ₃ PO ₄	65
Figura 20. Isotermas de biosorción BET para la BC carbonizada con impregnaciones de 0, 5, 10, o 15 mol/L de KOH	68

Figura 21. Isotermas de biosorción BET para la BC y la BC compuesta con polipirrol	70
Figura 22. Espectro de infrarrojo por absorbancia	71
Figura 23. Espectro de infrarrojo por transmitancia	71
Figura 24. Espectro de infrarrojo para la BC	73
Figura 25. Espectro de infrarrojo para la BC antes (a) y después del proceso de biosorción del colorante AM (b)	74
Figura 26. Espectro de infrarrojo para la BC antes y después del proceso de biosorción del colorante CV	74
Figura 27. Espectro FTIR de la BC antes y después de la biosorción de los colorantes azul de toluidina y CV	75
Figura 28. Espectro de infrarrojo para la BC, compuesto de BC con polipirrol y polipirrol	79
Figura 29. Lavado de BC con agua caliente	80
Figura 30. Diagrama de flujo del pretratamiento de la BC	81
Figura 31. Datos bibliográficos sobre la BC y la BC modificada para la remoción de colorantes sintéticos en los últimos 18 años	83
Figura 32. Efecto del pH de la solución en la remoción de NM	92
Figura 33. Efecto del pH en la biosorción de Remazol Azul (RA) y Azul Básico (AB)	93
Figura 34. Biosorción de los colorantes AM y NM a partir de la BC modificada con HCl 1,0 M y carbonizada a 900 y 950°C	95
Figura 35. Efecto de la concentración inicial en la capacidad de biosorción de los colorantes AM (a) y NM (b)	96
Figura 36. Efecto de la concentración inicial en la capacidad de biosorción de los colorantes CV (a) y azul de toluidina (b)	97
Figura 37. Efecto de la concentración inicial del colorante negro reactivo 5 (a) y RC (b) en la capacidad de biosorción (■) y el porcentaje de remoción (●)	98
Figura 38. Efecto de la concentración inicial para la remoción del colorante VM	98
Figura 39. Efecto de la cantidad de biosorbente para la biosorción del colorante ácido	100
Figura 40. Efecto de la dosis de absorbente en la remoción de AM con BC	101
Figura 41. Efecto del tiempo de contacto en la biosorción del colorante AM a partir de la BC	103
Figura 42. Efecto del tiempo de contacto en la biosorción del colorante VM a partir de la BC	103
Figura 43. Porcentaje de granulometría de la BC	104
Figura 44. Porcentaje de remoción a un tamaño de partícula de 1-2 mm	106

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Colorantes según su modo de aplicación al sustrato	29
Tabla 2. Principales tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes	34
Tabla 3. Composición química de la BC	38
Tabla 4. Propiedades de la BC	39
Tabla 5. Valores medidos del PCC presente en diferentes estudios	52
Tabla 6. Área de superficie y volumen de los poros para la BC carbonizada y modificada con H_3PO_4	66
Tabla 7. Área de superficie y volumen de los poros para la BC carbonizada a diferentes temperaturas	67
Tabla 8. Área de superficie y volumen de los poros para la BC carbonizada a diferentes temperaturas e impregnada con HCl 1 M	67
Tabla 9. Área de superficie para la BC compuesta con polietilenimina	69
Tabla 10. Grupos funcionales de las diferentes bandas para la BC antes y después del proceso de biosorción de los colorantes CV y azul de toluidina	76
Tabla 11. Grupos funcionales de las diferentes bandas para la BC y la BC carbonizada y modificada con HNO_3	76
Tabla 12. Características de los grupos funcionales para el CA y la BC modificada con 30%, 60%, 120% y 180% de H_3PO_4	77
Tabla 13. Grupos funcionales de las diferentes bandas para la BC modificada con KOH	78
Tabla 14. Datos bibliográficos sobre el pretratamiento realizado a la BC	81
Tabla 15. Efecto de la impregnación del CA de BC con KOH	84
Tabla 16. Datos bibliográficos sobre porcentajes de remoción y capacidades máximas de biosorción	90
Tabla 17. Datos bibliográficos sobre la concentración inicial de colorante de distintas investigaciones	94
Tabla 18. Datos bibliográficos de la dosis de biosorbente usado en la remoción de colorantes sintéticos	99
Tabla 19. Máxima capacidad de biosorción ($q_{máx}$) y porcentaje de remoción a diferentes tiempos de contacto	101
Tabla 20. Porcentajes de remoción de los colorantes VM, AM y R40 para diferentes tamaños de partícula	105
Tabla 21. Datos bibliográficos sobre la remoción de colorantes con BC a diferentes temperaturas	107
Tabla 22. Recopilación de investigaciones con sus respectivos parámetros	109

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Listado de las longitudes de onda características para los grupos funcionales más comunes	129

LISTA DE ABREVIATURAS

°C	Grado Celsius
AM	Azul de metileno
BC	Borra de café
BDDT	Brunauer, Deming, Deming, Teller
BET	Brunauer, Emmett y Teller
C.I	Índice de Color (Colour Index)
CA	Carbón activado
CH₃CO₂K	Acetato de potasio
Cl	Cloro
cm	Centímetro
Co	Cobalto
CO₂	Dióxido de carbono
CV	Cristal violeta
FeCl₃	Cloruro de hierro
Fe₃O₄	Óxido de hierro
FTIR	Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier
g	Gramo
H₂	Hidrógeno
h	Hora
H₂O	Agua
H₂O₂	Peróxido de hidrógeno
H₃PO₄	Ácido fosfórico
HCl	Ácido clorhídrico
HNO₃	Ácido nítrico
ICO	Organización Internacional del Café
IUPAC	Unión Internacional de Química Pura y Aplicada
K	Kelvin
KBr	Bromuro de potasio
KCl	Cloruro de potasio
Kg	Kilogramo
KOH	Hidróxido de potasio
LiOH	Hidróxido de litio
meq	Miliequivalente
mg	Miligramos
min	Minutos
mm	Milímetro
mmHg	Milímetro de mercurio

N₂	Nitrógeno
NaCl	Cloruro de sodio
NaNO₃	Nitrato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
NM	Naranja de metilo
nm	Nanómetro
P°	Presión de saturación del N ₂ a 77 K
p/p	Peso a peso
PCC	Punto de carga cero
pH	Potencial de hidrógeno
ppm	Partes por millón
Pt	Platino
q_{máx}	Capacidad máxima de biosorción
R40	Rojo cuarenta
RB	Rodamina B
RC	Rojo congo
rpm	Revoluciones por minuto
SEM	Microscopia electrónica de barrido
TGA	Análisis termogravimétrico
UV	Ultravioleta
UV-Vis	Espectrofotometría ultravioleta-visible
VM	Verde malaquita
XRD	Difracción de rayos X
ZnCl₂	Cloruro de zinc
μm	Micrómetro

GLOSARIO

ANFÓTERO: sustancia que puede comportarse como ácida o básica según el medio en el que se encuentre¹.

BIODEGRADACIÓN: descomposición de sustancias o productos mediante la acción de organismos vivos².

BIOMASA: materia viva producida por plantas, animales, hongos o bacterias³.

BIOSORBATO: sustancia o contaminante que se concentra en la superficie del biosorbente.

BIOSORBENTE: material generalmente sólido que permite retener sobre su superficie las moléculas de otra sustancia.

BIOSORCIÓN: proceso mediante el cual se retiene compuestos en la superficie del biosorbente.

BORRA DE CAFÉ: residuo generado durante la preparación de la bebida de café.

COLORANTE: compuesto químico soluble que al aplicarse a un sustrato le imparte color.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN: capacidad de remover la carga contaminante del agua expresada en porcentaje de remoción.

ESPECTRO: representación gráfica de la distribución de las bandas características a los grupos funcionales presentes en la muestra analizada.

MICROGRAFÍA: imágenes adquiridas por medio de un microscopio electrónico⁴

PIGMENTO: partículas sólidas insolubles en agua que imparten color.

RECALCITRANTE: sustancia que persiste en el medio y no puede ser fácilmente biodegradada.

¹QUÍMICA.ES. Anfótero. [en línea]. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Hi7Q9jD>

²REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Biodegradación. [en línea]. Madrid: 2019. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Yi7Ev0u>

³DIARIO ECOLOGÍA. [en línea]. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Mi7RLJ6>

⁴GONZÁLEZ, Miguel y HERNÁNDEZ, Alma. De la micrografía al arte generativo. *Investigación en discapacidad*. 2014, Vol. 3, Nro. 3, pp. 148.

TIEMPO DE CONTACTO: tiempo transcurrido en el que una sustancia está en contacto con un líquido o gas, hasta alcanzar el equilibrio.

RESUMEN

La investigación se centró en la evaluación de la viabilidad del uso de la borra de café (BC) para la remoción de colorantes sintéticos en el agua. Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica sobre la biosorción de diferentes tipos de colorantes con el uso de este residuo, observando las generalidades en cuanto a las modificaciones, sus respectivas caracterizaciones y las variables de operación que influyeron en el proceso. Igualmente se identificaron las principales metodologías usadas en la caracterización de este residuo, siendo el punto de carga cero (PCC), la microscopía electrónica de barrido (SEM), las isotermas de Brunauer-Emmett-Teller (BET) y la espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), técnicas que brindan información de la estructura, morfología y composición de la BC y la BC modificada. Finalmente, se evidenció que el proceso de biosorción no sólo depende de la afinidad entre el biosorbente y el biosorbato, sino también del pretratamiento o las modificaciones que tenga esta biomasa. Así como las variables pH, concentración inicial del colorante, dosis de biosorbente, tiempo de contacto, tamaño de partícula y temperatura, que influyen en la capacidad de biosorción o el porcentaje de remoción de los colorantes sintéticos en el agua.

Palabras claves: biosorción, borra de café, capacidad de biosorción, colorantes sintéticos, modificación, porcentaje de remoción.

ABSTRACT

The research focused on evaluating the feasibility of using coffee grounds (CG) for the removal of synthetic dyes in water. Initially, a bibliographic review was carried out on the biosorption of different types of dyes with the use of this residue, observing the generalities regarding the modifications, their respective characterizations and the operating variables that influenced the process. The main methodologies used in the characterization of this residue were also identified, being the point of zero charge (PZC), the scanning electron microscopy (SEM), the Brunauer-Emmett-Teller isotherms (BET) and the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), techniques that provide information on the structure, morphology and composition of the CG and the modified CG. Finally, it was shown that the biosorption process depends not only on the affinity between the biosorbent and the biosorbate, but also on the pretreatment or the modifications that this biomass has. As well as the variables pH, initial dye concentration, biosorbent dose, contact time, particle size and temperature, which influence the biosorption capacity or the percentage of removal of synthetic dyes in the water.

Key words: biosorption, biosorption capacity, coffee bean, modification, removal percentage, synthetic dyes.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua se ha convertido en uno de los principales problemas en el mundo, generado por el aumento en la demanda poblacional e industrial de este recurso natural esencial para la vida. Como resultado, grandes volúmenes de agua son vertidos diariamente con un alto contenido de compuestos químicos orgánicos, como son los colorantes sintéticos, usados en industrias textiles, de alimentos, plásticos, cosméticos, farmacéuticos entre otros; para el teñido de sus productos. Si bien menciona Figueroa, Hormaza y Moreno “700.000 toneladas y alrededor de 10.000 colorantes diferentes y pigmentos son producidos anualmente en todo el mundo, del cual el 10% se vierte a través de aguas residuales”⁵. Por consiguiente los colorantes sintéticos al ser moléculas orgánicas recalcitrantes, estables a la luz, al calor y a los agentes oxidantes afectan los ecosistemas acuáticos⁶. Impidiendo el paso de la luz solar a través del agua y provocando una reducción tanto en la actividad fotosintética de las especies vegetales, como la disminución en la cantidad de oxígeno disponible⁷. Adicionalmente, es importante señalar el alto grado de toxicidad de algunos colorantes, considerados como sustancias mutagénicas y cancerígenas que requieren ser removidas antes del vertimiento en los cuerpos de agua⁸.

En vista del impacto ocasionado por los colorantes sintéticos disueltos en las fuentes hídricas, se han desarrollado diferentes métodos para su remoción tales como: ozonización, oxidación química, reacción de fenton, membranas de filtración, intercambio iónico, entre otros⁹. Siendo tecnologías que además de formar lodos concentrados, pueden resultar costosas y poco eficientes al presentar una gran estabilidad frente a los agentes oxidantes y a la digestión aeróbica¹⁰. No obstante el proceso de biosorción es uno de los métodos más

⁵MORENO, Anderson; FIGUEROA, Danilo y HORMAZA, Angelina. Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Producción más limpia*. 2012, Vol. 7, Nro 1, pp. 11.

⁶BROCHE, María; et al. Caracterización de los residuos agrícolas de sorgo para su uso como material biosorbente de colorantes. *Revista Centro de Azúcar*. 2018, Vol. 45, Nro. 4, pp. 65. ISSN 2223-4861.

⁷TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 15

⁸CASTELLAR, Grey; et al. Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*. 2013, Vol. 16, Nro. 1, pp. 263.

⁹MONTES, Erika. Estudio de adsorción de ácido rojo 114 y básico azul 3 sobre tallo de girasol. Bogotá, Colombia. Universidad libre. 2014. p. 24.

¹⁰GALLARDO, Erika; MAIOCO, Silvia y FRANCOIS, Nora. Remoción de un colorante básico con quitosano y con un material compuesto de quitosano-zeolita. Universidad de Buenos Aires, 2008. p. 1.

aceptados en la remoción de contaminantes en comparación a los métodos convencionales, en especial con el uso del carbón activado (CA), uno de los biosorbentes más populares por sus características estructurales y su textura porosa que le otorgan una gran área de superficie para la descontaminación del agua¹¹. Sin embargo, el alto costo de operación por el uso y la regeneración del CA, ha llevado a la búsqueda de nuevos materiales más económicos que no den lugar a la formación de sustancias peligrosas en el medio ambiente y que además se puedan regenerar¹².

Existe entonces una justificada necesidad del uso de nuevas alternativas para el tratamiento de colorantes que sean de bajo costo, amigables con el medio ambiente y de naturaleza renovable, como son las biomasas, materiales que han intensificado su implementación en los últimos años al no requerir ningún suministro de nutrientes, como es el caso de los residuos agroindustriales e industriales¹³.

De acuerdo con las cifras de la Organización Internacional de Café (ICO), la producción del grano de café en Colombia fue de 13,6 millones de sacos de 60 kg¹⁴, estimando que menos del 5% de la materia vegetal es aprovechada para la elaboración de la bebida de café y que el 10% representa el residuo de BC o bagazo de café¹⁵. Razón por la cual el enfoque de este trabajo se centra en la evaluación de la viabilidad del uso de la BC como biosorbente de fácil obtención y de gran abundancia, abordando las diferentes investigaciones, su caracterización y las variables más importantes que afectan la remoción de los colorantes sintéticos disueltos en el agua.

Este documento está organizado en seis capítulos. El primer capítulo corresponde al marco de referencia. En el segundo capítulo se realiza el estado del arte del uso de la BC para la remoción de colorantes sintéticos. El tercer capítulo abarca las diferentes metodologías empleadas para la caracterización de la BC y la BC modificada. En el cuarto capítulo se establecen las variables que influyen en la

¹¹ROMERO, Luis. Preparación y uso de cáscaras de naranja como biosorbente para la remoción de compuestos orgánicos. Santiago de Querétaro, México: Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico en Electroquímica, 2013. p. 1.

¹²Ibid., p. 1.

¹³RAMOS, Jaidith. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010. p. 33

¹⁴CIFUENTES, Valerie. Durante 2018 la producción de café mundial fue de 168 millones de sacos de 60 kg. [en línea]. La república: 2019. [Consultado 4, septiembre, 2019]. Disponible en: <https://cutt.ly/LyNk9M8>

¹⁵CENICAFÉ. Manejo de subproductos. Centro Nacional de Investigaciones de Café. [en línea]. 2016. [Consultado 6, septiembre de 2019]. Disponible en: <https://cutt.ly/dyNlqdx>

remoción de colorantes con el uso de la BC. Finalmente, en el capítulo cinco y seis se dan a conocer las conclusiones y recomendaciones respectivamente. La combinación integrada de estos seis capítulos provee una visión completa sobre la viabilidad de usar BC para la remoción de colorantes sintéticos en el agua.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad del uso de la borra de café para la remoción de colorantes sintéticos en el agua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar el estado del arte de la borra de café para la remoción de colorantes sintéticos en el agua.
- Identificar las principales metodologías usadas para la caracterización de la borra de café.
- Establecer las variables que influyen en la remoción de colorantes sintéticos en el agua a partir de la borra de café.

1. MARCO DE REFERENCIA

En este capítulo se presentan los conceptos generales de la contaminación hídrica por el vertimiento de colorantes, al ser sustancias químicas recalcitrantes que provocan una reducción de la actividad fotosintética y a su vez una disminución en el contenido de oxígeno disponible en los medios acuáticos, lo que favorece los procesos de eutrofización¹⁶. Pasando del concepto teórico, a su clasificación según su origen, su composición química y su aplicación al sustrato. Seguido de las diferentes técnicas usadas para la remoción de los colorantes, en especial mediante el método de biosorción con el uso de la BC.

1.1 CONTAMINACIÓN HÍDRICA

Se define como cualquier alteración física, química, radiactiva o microbiológica que ocasiona impactos sobre el ecosistema¹⁷. Generando una alteración, modificación o transformación de las características y propiedades naturales del agua, por agentes fisicoquímicos o biológicos¹⁸. Los cuales afectan tanto el entorno natural de las fuentes hídricas, como la degradación y el deterioro de los recursos naturales que provocan una escasez del agua potable para el consumo humano¹⁹. Las principales fuentes de contaminación del agua pueden ser de tipo natural o antropogénico y varían según su comportamiento, su diversidad y sus efectos colaterales.

1.1.1 Fuentes naturales. Corresponden a fuentes de contaminación de origen natural procedentes del contacto con la atmósfera y el suelo, como las sales minerales, residuos vegetales, calcio, hierro, magnesio entre otros²⁰. A pesar de ser fuentes de contaminación en los cuerpos hídricos, Echarri afirma que “Normalmente las fuentes de contaminación natural son muy dispersas y no provocan concentraciones altas de polución, excepto en lugares muy concretos”²¹.

¹⁶GARZON, Rossana. Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de Agave tequilana Webber var. Azul. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, 2009. p. 14.

¹⁷COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA. Decreto 0475 de 1998. Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable. [en línea]. Santa Fe de Bogotá, D.C.: El ministerio, 1998. 2 p. [Consultado 19, febrero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/zrMK76O>

¹⁸PINEDA, José. Contaminación del agua, causas, consecuencias y soluciones. [en línea]. encolombia. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/frMJFwd>

¹⁹Ibid.

²⁰SANCHÓN, MV. Contaminación del agua. [en línea]. Salud pública y AP de salud. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/TrMKbmb>

²¹ECHARRI, Luis. Ciencias de la tierra y del medio ambiente [en línea]. Libro electrónico, Ed. Teide. 1998. Cap 11. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/SyVPn4g>

Razón por la cual estas sustancias pueden ser identificadas fácilmente para ser tratadas y eliminadas.

1.1.2 Fuentes antropogénicas. Son fuentes de contaminación artificial provocadas por actividades humanas cuyos componentes de origen doméstico, urbano, industrial o agrario, generan un riesgo para el medio ambiente y la salud de diversos organismos al ser sustancias de difícil remoción²², como es el caso de los colorantes. Cabe resaltar que este tipo de contaminantes pueden ser categorizados como fuentes de contaminación puntuales o no puntuales. Siendo la primera un tipo de contaminación de fácil monitoreo e identificación, al ser descargadas en un área específica a partir de tuberías o canales. Por el contrario la contaminación no puntual es el resultado de descargas que abarcan grandes áreas no controladas, al desconocer el punto de entrada al cuerpo hídrico²³.

1.2 COLORANTES

Se definen como compuestos químicos de origen natural o artificial, cuya afinidad al sustrato aplicado, como fibras textiles, cueros, papel, plástico, cosméticos, fármacos o alimentos, por solución o dispersión, les imparten color²⁴. A diferencia de los pigmentos, resultan ser sustancias completamente solubles en agua y no requieren de un vehículo adherente para impartir el color al sustrato²⁵. Normalmente los colorantes le deben su color a dos componentes principales en su estructura conocidos como cromóforos y auxócromos. Siendo el grupo cromóforo sustancias capaces de absorber la luz visible y excitarse para impartir color, dependiendo de las longitudes de onda de la energía emitida, específicamente a longitudes de onda entre los 400 y 800 nm donde se visualiza el color²⁶. En cambio el grupo auxócromo intensifica la acción de los cromóforos, además de fijar el color y proporcionar la solubilidad del colorante²⁷. Generalmente los colorantes se clasifican bajo diferentes parámetros: de acuerdo a su origen sea natural o sintético, según su estructura química como colorantes no azoicos o colorantes azoicos y de acuerdo a su modo de aplicación al sustrato.

²²Ibíd.

²³TISSOT, Florencia. Contaminación en agua. [en línea]. Docplayer: 2010. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/trML5BG>

²⁴RAMOS. Op. Cit., p. 22.

²⁵MARTÍNEZ, Jaime. Comportamiento electroquímico de colorantes antraquinónicos, azul de metileno y compuestos afines en solución de solventes no acuosos. Universidad Nacional de la Plata. 2017, p. 20.

²⁶PAREDES, Benigna. Análisis y obtención de colorante natural a partir de la Baccharis Latifolia (Chilca). Ecuador: Universidad técnica del norte, 2002. p.18.

²⁷Ibíd., p.19.

1.2.1 Colorantes naturales. Son compuestos químicos cuyo origen natural se encuentran en plantas, animales e incluso minerales²⁸. Este tipo de colorantes han generado una gran popularidad en productos de consumo humano como alimentos, fármacos y cosméticos gracias a su inocuidad. Sin embargo, muestran desventajas en su uso al ser colorantes sensibles a la luz, al calor, al pH, además de presentar un bajo poder tintóreo y un costo elevado en comparación a los colorantes sintéticos²⁹.

1.2.2 Colorantes sintéticos. Son compuestos elaborados por síntesis química, con excelentes propiedades en cuanto a su capacidad de producción, su resistencia a los tratamientos durante el proceso de fabricación, así como una alta gama de colores a un menor costo en comparación a los colorantes naturales³⁰. Estos colorantes han sido usados en diferentes industrias para la tinción de productos como fármacos, cosméticos, alimentos, textiles entre otros. Sin embargo sus complejas estructuras aromáticas, pueden exhibir una mayor resistencia a la fotodegradación, al calor o a los agentes oxidantes respectivamente, generando impactos ambientales en la vida acuática³¹. Vale la pena señalar que la clasificación de los colorantes sintéticos se encuentra recopilada a partir de la codificación de los colorantes y pigmentos en el Índice de Color (C.I, Colour Index), catalogados según su aplicación tintórea al sustrato y su estructura química.

1.2.2.1 Colorantes Azoicos. Son colorantes caracterizados por la presencia de uno o más grupos azo (-N=N-), conjugados a un grupo aromático por ambos extremos como se ilustra en la Figura 1. Cuyas propiedades anfóteras presentes en los grupos funcionales carboxilo, hidroxilo o amino, permiten comportarse de forma aniónica, catiónica o no iónica dependiendo del pH de la solución en la que se encuentren³². Este tipo de colorante resulta ser uno de los más numerosos al

²⁸SCUTERI, Marta. Aditivos alimentarios. [en línea]. Slideplayer. [Consultado 12, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Nr1dZI6>

²⁹MARCANO, Deanna. Colorantes naturales. En: Introducción a la química de los colorantes. 2a.ed. Caracas, Venezuela: Colección Divulgación Científica y Tecnológica, 2018. 139.

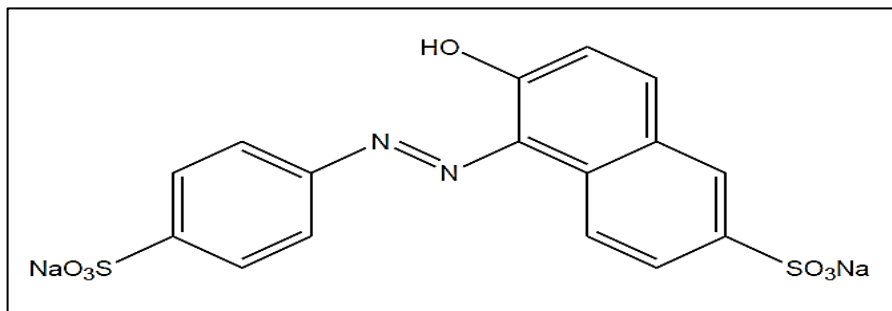
³⁰PARRA, Verónica. Estudio comparativo en el uso de colorantes naturales y sintéticos en alimentos, desde el punto de vista funcional y toxicológico. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2004. p.8.

³¹KYZAS, George Z; et al. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chemical engineering journal*. 2012, Vol. 189-190, pp. 148.

³²AJMAL, Anila; et al. Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. *The royal Society of Chemistry*. 2014, Vol. 4, Nro. 70 p. 37005.

representar cerca del 40-50% del total de los colorantes, gracias a su fácil acceso y su amplia gama de colores que van desde el amarillo hasta el negro³³.

Figura 1. Estructura química del colorante Amarillo Anaranjado



Fuente: ENSUNCHO, Adolfo; ROBLES, Juana y CARRIAZO, José. Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Sociedad Química de Perú*. 2015, Vol. 81, Nro. 2, pp.136. ISSN 1810-634X.

Sin embargo entre el 10 y el 15% de estos colorantes son descargados a través de aguas residuales, ocasionando problemas ambientales por ser altamente tóxicos o carcinogénicos³⁴. Considerando la gran abundancia de los colorantes azoicos y sus diferentes técnicas o maneras de aplicar el colorante al material ya sea papel, fibras, tejidos entre otros. Se pueden subclasificar en colorantes reactivos, ácidos, básicos, directos, dispersos o a la tina como se presenta en el Tabla 1.

Tabla 1. Colorantes según su modo de aplicación al sustrato

Clase	Propiedades	Sustratos
Básicos	<ul style="list-style-type: none"> Colorantes catiónicos. Exponen una mayor afinidad a las fibras de poliéster, nylon modificado y varios medicamentos solubles en agua. Se encuentran unidos al sustrato mediante fuerzas polares. 	Nylon modificado, poliéster, papel.

Fuente: elaboración propia con base en: TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 29.

³³BERGOLLA, Samuel. Colorantes. [en línea]. Scribd: 2012. [Consultado 05, febrero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/uyBjweV>

³⁴TAN, N; et al. Degradation of azo dye mordant yellow 10 in a sequential anaerobic and bioaugmented aerobic bioreactor. *Water Science and Technology*. 2000, Vol. 42, Nro. 5-6. pp. 337.

Tabla 1. (Continuación)

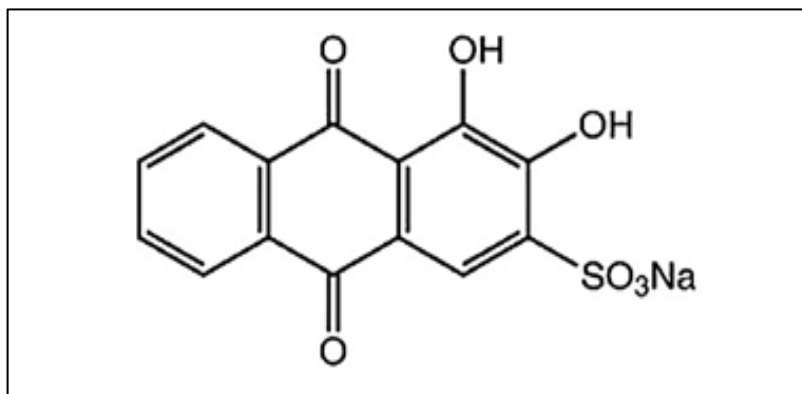
Clase	Propiedades	Sustratos
Ácidos	<ul style="list-style-type: none"> • Colorantes aniónicos. • Usados en industrias de curtiembres, alimentos, imprenta, nylon y madera. • No presentan afinidad por las fibras celulósicas. • Unidos mediante fuerzas polares. 	Nylon, lana, papel seda y cuero
Directos	<ul style="list-style-type: none"> • Colorantes aniónicos. • Muestran una mayor afinidad a las fibras celulósicas. • Se fijan mediante puentes de hidrógeno con los grupos hidroxilos de la celulosa. 	Algodón, rayón, cuero y nylon
Reactivos	<ul style="list-style-type: none"> • Colorantes aniónicos • Usados en mayor medida para el teñido de fibras celulósicas como el algodón. • Unidos mediante enlaces covalentes. • Mayor solidez del color en comparación a los colorantes directos. 	Algodón, lana, seda y nylon
Dispersos	<ul style="list-style-type: none"> • Colorantes no iónicos insolubles en agua. • Se adhieren a las fibras hidrófobas (poliéster, nylon, fibras acrílicas etc.) mediante interacciones dipolares. 	Poliéster, nylon y poliamida
Tina	<ul style="list-style-type: none"> • Usados para el teñido de materiales celulósicos, detergentes, fibras, aceites y pinturas. • Insolubles en agua. 	Algodón, rayón y lana

Fuente: elaboración propia con base en: TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 29.

1.2.2.2 Colorantes de Antraquinona. Son el segundo grupo de colorantes más importante de tipo aromático con colores azul y turquesa. Estos colorantes son usados en la tinción de algodón y cuero, al presentar una mayor resistencia a la fotodegradación³⁵ (Figura 2).

³⁵ TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 29.

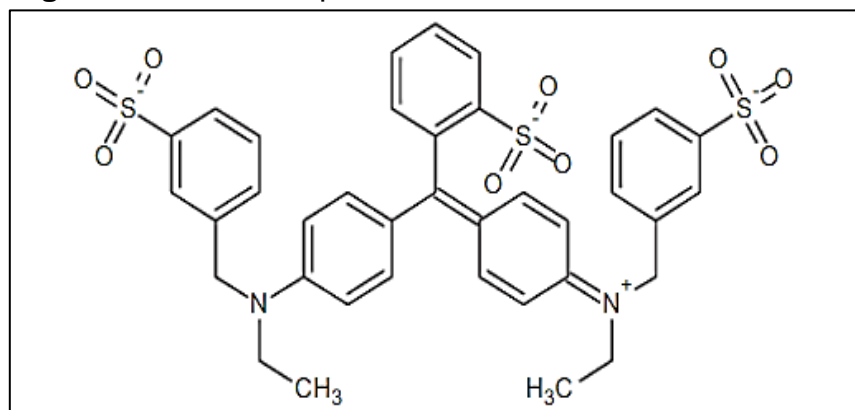
Figura 2. Estructura química del colorante Rojo de Alizarina



Fuente: LERICI, Laura; et al. Photocatalytic decoloration of alizarin s red employing iron nanocatalysts. *Revista tecnología y Ciencia*. 2019, Nro. 36. pp. 107.

1.2.2.3 Colorantes de Trifenilmetano. Son sustancias complejas de colores verdes, azules y violetas, que cuentan con una estructura molecular de tres anillos aromáticos unidos a un átomo de carbono central como se ilustra en la Figura 3. Presentando una gran estabilidad e intensidad en la coloración para ser usados en productos como lana y seda³⁶.

Figura 3. Estructura química del colorante Azul Brillante FCF



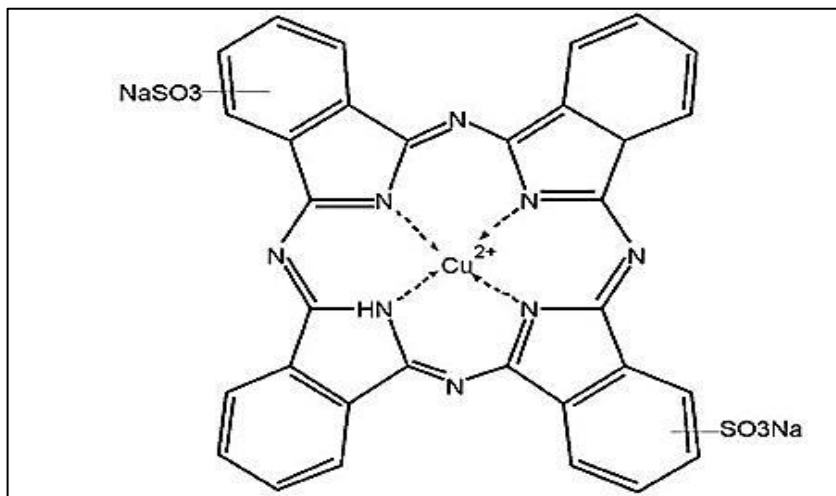
Fuente: HORMAZA, Angelina y SUAREZ, Edgar. Estudio del proceso de biosorción de dos colorantes estructuralmente diferentes sobre residuos avícolas. *Sociedad Química de Perú*. 2009, Vol. 75, Nro. 3, pp. 332. ISSN 1810-634X.

1.2.2.4 Colorantes de Ftalocianina. Son colorantes usados en materiales plásticos, tintas de esferos, esmaltes y en la industria textil, atribuyendo

³⁶Ibíd., p. 29.

coloraciones azules y verdes. Estos colorantes además de ser resistentes a la luz, presentan una estructura con dos anillos fusionados, uno bencénico y uno piridina conocidos como grupos Iso-Indol³⁷ (Figura 4).

Figura 4. Estructura química del colorante Azul Directo 199



Fuente: LEGUIZAMÓN, Juliana; et al. Fotosensibilización de TiO₂ con un colorante comercial para fotodegradación de contaminantes orgánicos en agua. *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*. 2010, Vol. 13, Nro. 2, pp.186.

1.3 IMPACTO AMBIENTAL DE LOS COLORANTES EN EL AGUA

El incremento en el número de compuestos orgánicos descargados al ambiente sin ningún tipo de control o tratamiento previo para su disposición final en los cuerpos de agua, resultan ser una de las preocupaciones reconocidas por la comunidad científica internacional³⁸. En la actualidad el uso de colorantes sintéticos en industrias de papel, alimentos, cuero, cosméticos, en especial de la industria textil, que usa dos tercios del mercado total de los colorantes³⁹, han aumentado la liberación de efluentes coloreados alcalinos generalmente tóxicos para los seres humanos y la vida acuática⁴⁰. Adicionalmente la industria textil consume 100 L de agua para el teñido de las fibras, del cual aproximadamente el

³⁷Ibid., p. 29.

³⁸COCA, Yoandy. Remoción de azul de metileno en medio acuoso usando residuos agrícolas de sorgo (RAS). Universidad Central "Marta Abreu" de las villas, 2016. p. 3.

³⁹ALEMÁN, Arnulfo. Evaluación de la esterificación sobre cascarilla de arroz como estrategia para incrementar la capacidad de remoción del colorante rojo básico 46. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede-Medellín, 2012. p.17

⁴⁰REHMAN, Rabia; et al. Removal of alizarin red s (dye) from aqueous media by using alumina as an adsorbent. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2011, Vol. 33, Nro. 2, pp. 228.

40% del colorante usado es liberado en los efluentes⁴¹. Como consecuencia los colorantes han adquirido una gran importancia no solo por los problemas estéticos que presentan como primer contaminante reconocido visiblemente en los cuerpos hídricos, en concentraciones mínimas de 1,0 ppm, sino también por la capacidad que tienen para acumularse e inhibir el paso de los rayos UV a través del agua, afectando la flora y la fauna del entorno⁴². Asimismo la compleja estructura química aromática con la que fueron diseñados para ser resistentes, impide la biodegradación debido a su estabilidad a las condiciones ambientales como la luz, la temperatura y otros factores comunes de intemperie que dificultan el ataque microbiano, requiriendo largos periodos para su degradación⁴³. Como resultado el vertimiento de colorantes en Colombia dentro de las fuentes hídricas, se regula bajo la resolución número 3957 del 19 de junio de 2009 en el Artículo 14, donde se establece los valores de referencia para los vertimientos a la red de alcantarillado con un máximo permitido de 50 unidades en dilución 1/20 unidades de Pt-Co a un pH entre 5,0-9,0⁴⁴. Siendo el pH uno de los principales factores que influyen tanto en la estructura química del colorante como en el proceso de biosorción⁴⁵.

1.4 MÉTODOS CONVENCIONALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON COLORANTES

En vista de los graves problemas que han expuesto los colorantes sintéticos, diversas investigaciones han estudiado un amplio número de tecnologías implementadas en el tratamiento de efluentes contaminados, presentando ventajas y desventajas como se ilustra en la Tabla 2.

⁴¹ZULETA, Ana. Evaluación del proceso de degradación de un colorante sintético tipo azo mediante un sistema de fermentación en estado sólido. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2013. p.2.

⁴²TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 15.

⁴³PIÑA, Scherezada. Decoloración biológica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio. Universidad Nacional Autónoma de México, 2007. p.9.

⁴⁴GUZMÁN, Héctor. Eficiencia energética y energías limpias. [en línea]. OPEN oportunidades de mercado para energías limpias y eficiencia energética: 2011. [Consultado 02, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/VyNjhic>

⁴⁵TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 42.

Tabla 2. Principales tecnologías para el tratamiento de aguas contaminadas por colorantes

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Ozonización	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicada en estado gaseoso para no alterar el volumen del agua residual. • Eficaz en la oxidación de colorantes básicos, ácidos y directos. • Puede llegar a remover el color en su totalidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Vida media corta de aproximadamente 20 min, lo que repercute en costos del proceso. • Los compuestos generados presentan un mayor carácter tóxico que los colorantes de partida.
Hipoclorito de sodio	<ul style="list-style-type: none"> • Ataca el grupo amino del colorante a partir de la molécula de Cl. • Acelera el rompimiento de enlaces azo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Liberación de aminas aromáticas (moléculas cancerígenas y tóxicas). • Uso de cloro para la remoción de colorantes
Reacción de Fenton	<ul style="list-style-type: none"> • Técnica eficaz para la decoloración de colorantes solubles e insolubles. • Tiempos de residencia cortos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de lodos • Elevado costo de reactivos
Fotoquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Degrada las moléculas del colorante a CO₂ y H₂O mediante luz UV en presencia de H₂O₂. • Reducción de malos olores. • No genera producción de lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos • Formación de subproductos tales como haluros, metales, ácidos orgánicos, aldehídos orgánicos y ácidos orgánicos.
Destrucción electroquímica	<ul style="list-style-type: none"> • Método eficaz para la remoción de colorantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos en consumo de electricidad.

Fuente: elaboración propia con base en: TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 37, 38 y 39

Tabla 2. (Continuación)

Tecnología	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> • No requiere consumo de químicos. • No presenta producción de lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tasas relativamente altas de flujo causan una disminución en la remoción de colorantes
Membranas de filtración	<ul style="list-style-type: none"> • Remoción de todo tipo de colorantes. • Resistencia a la temperatura, al efecto de un ambiente químico y de un ataque microbiano. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta concentración de lodos • Ineficiente para el tratamiento de grandes volúmenes. • Costos en la reposición periódica. • Vida útil limitada. • Usado para bajas concentraciones de colorantes.
Intercambio iónico	<ul style="list-style-type: none"> • Permite su regeneración • Usado tanto para colorantes catiónicos como aniónicos. • Recuperación de disolventes después de su uso. 	<ul style="list-style-type: none"> • No es efectivo para colorantes dispersos. • Altos costos por el uso de disolventes orgánicos.
Coagulación-Floculación	<ul style="list-style-type: none"> • Simple, económico y factible. • Equilibrio dado en tiempos de 2 a 4 h. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de lodos • Se requiere un exceso de coagulante para lograr mejores rendimientos. • Bajos resultados para la remoción de colorantes azoicos.
Carbón activado	<ul style="list-style-type: none"> • Buena eliminación de una gran variedad de colorantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo en su regeneración. • Pérdida de biosorbente

Fuente: elaboración propia con base en: TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 37, 38 y 39.

Tabla 2. (Continuación)

Tecnología	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none">• Gran capacidad de biosorción.	<ul style="list-style-type: none">• Inefectivo para colorantes dispersos y de tina.
Biosorción con biomasa viva/muerta	<ul style="list-style-type: none">• Económicamente atractivo.• Adsorbe compuestos altamente tóxicos en poco tiempo.• Se pueden recuperar los compuestos adsorbidos.	<ul style="list-style-type: none">• Pierde eficiencia a concentraciones muy altas de colorante.• Requiere o no modificaciones químicas.

Fuente: elaboración propia con base en: TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 37, 38 y 39.

A pesar de la existencia de un gran número de métodos físico-químicos o biológicos empleados en el tratamiento de efluentes contaminados con colorantes, se evidencian diversas limitaciones por sus costos elevados, su baja efectividad al presentar remociones incompletas o fraccionamientos del colorante, al igual que la generación de lodos concentrados y subproductos tales como las aminas aromáticas, anillos de naftaleno o benceno (Tabla 2), los cuales resultan ser más tóxicos dentro de los cuerpos hídricos⁴⁶. Por consiguiente el desarrollo de nuevas tecnologías que reduzcan las dificultades durante la remoción de colorantes, se ha convertido en un tema de investigación constante. Señalando que el proceso de biosorción resulta ser una de las técnicas más utilizadas por términos de costo inicial, facilidad de operación, flexibilidad y sencillez del diseño, que no dan lugar a la formación de sustancias peligrosas tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas. Por ende la biosorción en fase líquida resulta ser una clara alternativa para la remoción de efluentes contaminados con colorantes, compuestos fenólicos, metales pesados, hidrocarburos entre otros⁴⁷; más aún si la selección del biosorbente es de bajo costo y no requiere de un tratamiento adicional para su respectivo uso.

⁴⁶ZULETA. Op. Cit., p.1

⁴⁷RUIZ, Sonia. Evaluación de la remoción de colorante índigo utilizado en empresas dedicadas a la producción de telas tipo DENIM empleando a *Pleurotus ostreatus* como modelo biológico. Bogotá, Colombia: Universidad de la Sabana, 2011. p. 19.

1.5 BIOSORCIÓN

El proceso de biosorción es una clara alternativa en la remoción de contaminantes disueltos en el agua, por la capacidad que tienen algunas biomásas para retener y acumular partículas contaminantes de una solución acuosa⁴⁸. De ahí que el proceso de biosorción se encuentre definido como un sistema que involucra una fase sólida conocida como biosorbente y una fase líquida en la que se encuentran las especies disueltas que van a ser biosorbidas, a partir de diferentes mecanismos que permiten la atracción y el enlace de las especies a los grupos funcionales de la superficie del biosorbente hasta alcanzar el equilibrio. Si bien menciona Ramos “En los últimos años se ha intensificado el uso de biomásas o productos derivados de ella”⁴⁹, por el bajo costo que presentan, su fácil acceso y gran abundancia para el tratamiento de aguas contaminadas⁵⁰.

En la actualidad existe un gran número de biomásas usadas de forma natural o carbonizada como son los residuos agropecuarios o agroindustriales (residuos de café, fibra de coco, cáscara de naranja, bagazo de agave, entre otros). Al igual que los subproductos forestales, residuos de papel, residuos de procesamiento de alimentos entre otros materiales que no requieren ningún suministro de nutrientes para su funcionamiento como biosorbente⁵¹. Cabe resaltar que la efectividad de los materiales biosorbentes estará dada no solo por sus características fisicoquímicas sino también bajo diferentes variables que afectan el proceso de biosorción.

1.6 BORRA DE CAFÉ

El café es uno de los productos más consumidos a nivel mundial, que de acuerdo con las cifras de la Organización Internacional de Café (ICO) para el año 2018, la producción total de este grano fue de 168,09 millones de sacos de 60 Kg para todos los países exportadores de café⁴⁵. A pesar de su alta demanda y su gran producción a escala industrial, se estima que menos del 95% del fruto fresco es aprovechado ya que sólo el 5% es usado para la preparación de la bebida, siendo la BC el principal residuo sólido generado después de la torrefacción del grano de café o de la preparación de la bebida a nivel doméstico e industrial que representa el 10% del fruto fresco⁴⁶. Adicionalmente las

⁴⁸ALEA, Yadiel. Estudio de diferentes materiales biosorbentes para la remoción de azul de metileno en medio acuoso. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, 2018. p. 11 y 12.

⁴⁹RAMOS. Op. Cit., p. 34.

⁵⁰GAUR, Nisha; et al. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Royal Society of Chemistry*. 2014, Vol. 16, Nro. 2, pp. 187.

⁵¹ROMINA, Cintia. Remoción de azul de metileno en agua empleando bagazo de agave salmiana como biosorbente. México: Universidad Autónoma de San Luís Potosí, 2011. p. 27.

empresas productoras de café soluble como Decafé, Café Liofilizado, Nestlé, Colcafé e industrias aliadas, cuya producción total de la BC es cercana a las 22000 toneladas al año en base seca, mencionan que sólo un 13% de este residuo es aprovechado como combustible para las calderas y que el porcentaje restante es incinerado sin un uso definido o dispuesto en rellenos sanitarios⁴⁸. Provocando la proliferación de insectos, malos olores, aumentos en la concentración de metano y alta demanda de oxígeno para su descomposición al ser vertido a los cuerpos de agua o al ser eliminado en el suelo⁴⁹.

De acuerdo a lo mencionado la BC ha sido objeto de estudio en los últimos años como material para la elaboración de compostaje, la producción de biodiesel, biogás o bioetanol, como alimento para animales o combustible directo en las industrias. Así como biosorbente para la remoción de colorantes sintéticos o metales pesados en el agua, lo que genera soluciones al problema de contaminación, otorgándole un valor agregado al ser aprovechado⁵⁰. A continuación se presenta la composición química de la BC en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición química de la BC

Componente	%	Componente	%	Componente	%
Humedad	7-8	Ácido tánico	0,9	Aminoácidos (% proteína)	
Proteína cruda	10-12	Ácido palmítico	43,2	Alanina	6,23
Fibra cruda	35-44	Ácido palmitoléico	0,4	Valina	9
Nitrógeno libre	13-18	Ácido esteárico	9,7	Metionina	2
Ceniza	0,25-1	Ácido oleico	14	Isoleucina	6,3
Calcio	0,08	Ácido linoleico	37	Leucina	13,4
Magnesio	0,01	Ácido archídico	3,8	Tirosina	4,2
Potasio	0,04	Ácido gadoléico	0,4	Fenilalanina	8,3
Sodio	0,03	Ácido behénico	0,2	Lisina	2,9

Fuente: elaboración propia con base en: ANGARITA, Fernando. Borra de café como material adsorbente para la remoción de cromo (III). Bogotá, Colombia: Universidad Libre Sede Bogotá, 2013. p. 23.

Tabla 3. (Continuación)

Componente	%	Componente	%	Componente	%
Fósforo	0,01	Ácidos grasos libres	7,6	Histidina	2,2
Manganeso	26,8 ppm	Índice de yodo	85-93	Arginina	Trazas
Zinc	10 ppm	Índice de Saponificación	185-193	Hidroxiprolina	1
Cobre	35 ppm	Índice de peróxido	11-17	Glicina	7,6

Fuente: elaboración propia con base en: ANGARITA, Fernando. Borra de café como material adsorbente para la remoción de cromo (III). Bogotá, Colombia: Universidad Libre Sede Bogotá, 2013. p. 23.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, la BC presenta una gran variedad de compuestos orgánicos, en especial de ácidos grasos, proteínas, ácidos clorogénicos, carbohidratos y de una menor cantidad de cafeína y elementos trazas⁴⁷. Cabe mencionar que este residuo sólido rico en polisacáridos como la hemicelulosa, la celulosa y la lignina⁵², presenta diferentes propiedades como se muestra en la Tabla 4; las cuales pueden variar de acuerdo al pretratamiento o modificación durante la adecuación de este material para el proceso de biosorción de colorantes.

Tabla 4. Propiedades de la BC

Propiedades	Unidad
Densidad aparente	0,28 g
Humedad	60,01%
Cenizas	0,6-0,8%
Carbohidratos	64-65%
Grasas	18-26%
Proteínas	10-15%
Fibra	40,47%
Cafeína Trigonelina	Fracciones
pH	4,10

Fuente: HIDALGO, Carla y RIVERA, Solange. Obtención de carbón activado a partir del bagazo de café como una propuesta de utilización del residuo de una industria cafetera. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2017. p.14

⁵²GALANAKIS, Charis M. Healthy components of coffee processing by-products. En: Handbook of coffee processing by-products. Chania, Grecia: Academic Press, 2017. 34.

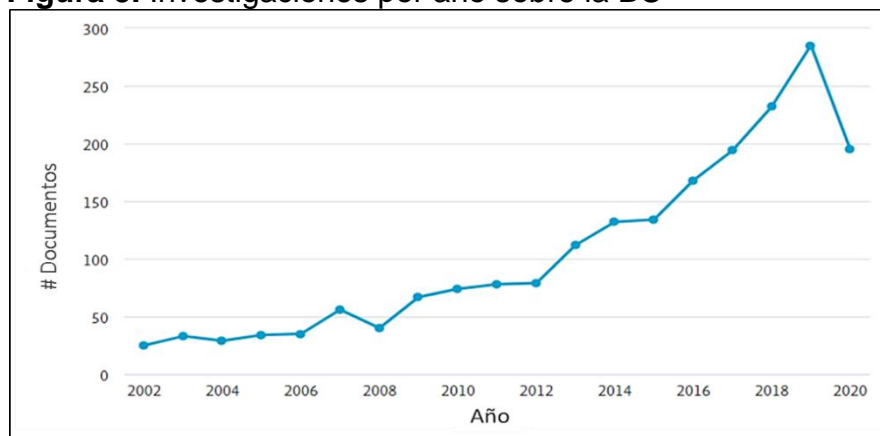
2. ESTADO DEL ARTE DE LA BORRA DE CAFÉ PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS EN EL AGUA

A continuación se presenta una revisión bibliográfica sobre las investigaciones realizadas por diversos autores con respecto al aprovechamiento de la BC en el tratamiento de aguas, específicamente en la biosorción de colorantes. Describiendo de forma general las metodologías de caracterización empleadas, las diferentes modificaciones realizadas a la BC y los parámetros establecidos durante el proceso de biosorción.

2.1 INVESTIGACIONES RELEVANTES

El vertimiento de efluentes coloreados y la disposición inadecuada de los residuos generados por el sector agroindustrial, son una de las principales causas de la contaminación ambiental⁵³. Para atender a esta problemática, en los últimos años se han realizado diversas investigaciones acerca del uso de estos materiales sólidos como biosorbentes para la remoción de colorantes sintéticos disueltos en el agua, como es el caso de la BC, la cual ha presentado un incremento en el número de investigaciones en los últimos 18 años como se muestra en la Figura 5. Al ser una biomasa abundante, de fácil adquisición y con una gran cantidad de compuestos químicos que les confieren su capacidad para remover colorantes⁵⁴.

Figura 5. Investigaciones por año sobre la BC



Fuente: SCOPUS. Análisis de resultados. Documentos por año. [en línea]. [Consultado 7, julio, 2020]. Disponible en: Base de datos Scopus

⁵³VARGAS, Yury y PÉREZ, Liliana. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 2018, Vol. 14, Nro. 1, pp. 60 y 68. ISSN 1900-4699.

⁵⁴TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 48 y 49.

2.2 REMOCIÓN DE COLORANTES BÁSICOS

Los residuos agroindustriales, como la BC, han sido objeto de estudio de diferentes autores para el tratamiento de aguas debido a que son un subproducto asequible, económico y versátil. Tal es el caso de Ramos⁵⁵, quien evaluó la capacidad de biosorción de la BC para la remoción de tres colorantes: azul de metileno (AM), verde malaquita (VM) y rojo cuarenta (R40), utilizando el método batch. Durante el desarrollo de los experimentos se analizó la influencia del pH, la concentración inicial del colorante y el tiempo de contacto a partir de un diseño factorial 2³. Las condiciones con mejores resultados para la remoción de colorantes básicos AM y VM, fueron un pH por encima de 4, concentración inicial de 100 mg/L y un tiempo de contacto de 120 min. Mientras que para la biosorción de R40 el pH óptimo se encontró por debajo de 4 a una concentración inicial de 25 mg/L por ser un colorante ácido. Adicionalmente, el autor caracterizó el biosorbente a partir de la determinación de sitios activos, encontrando una mayor cantidad de sitios ácidos (2,75 meq/g) que de sitios básicos. El pH en el PCC fue de 3,45 y el espectro FTIR mostró la presencia de grupos hidroxilos y carbonilos en su estructura. Finalmente, el equilibrio del proceso de biosorción se ajustó al modelo de Langmuir, obteniendo una capacidad máxima de biosorción de 34,48 mg/g para AM, 14,50 mg/g para VM y 0,65 mg/g para R40.

Igualmente, Kopsidas⁵⁶ analizó el efecto del pH, concentración inicial, tiempo de contacto y velocidad de agitación en la remoción de AM utilizando residuos de café a partir de experimentos por lotes. Adicionalmente se realizaron pruebas en sistema continuo, evaluando la profundidad, la velocidad del lecho, y la concentración del colorante. El autor determinó un incremento en la eliminación del AM a medida que aumentaba el pH, obteniendo una capacidad de biosorción de 78,90 mg/g, con lo cual concluyó que los residuos de café son un material lignocelulósico factible para la remoción de colorantes básicos.

Franca, Oliveira y Ferreira⁵⁷ analizaron el efecto del tiempo de contacto, cantidad de biosorbente y pH para la remoción de AM utilizando BC como biosorbente. En cuanto a la caracterización de la BC, los autores obtuvieron valores entre 3,4 y 3,6 en el PCC y mayor presencia de grupos carboxílicos en la superficie. Por otra

⁵⁵RAMOS. Op. cit., p. 15.

⁵⁶KOPSIDAS, Odysseas. Batch studies for methylene blue removal and recovery by untreated coffee residues. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 2017, Vol. 6, pp. 487 y 492.

⁵⁷FRANCA, Adriana; OLIVEIRA, Leandro y FERREIRA, Mauro. Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee Grounds. *Desalination*. 2009, Vol. 249, Nro. 1, pp. 269 y 272.

parte, el efecto del pH fue evaluado entre 3 y 11, obteniendo porcentajes de remoción del 81% a un pH igual a 3 y del 95% a un pH en el rango de 5-11. Asimismo el porcentaje de colorante removido aumentó con el incremento de la dosis del biosorbente. Los datos experimentales se ajustaron al modelo cinético de pseudo-segundo orden y la isoterma de Tempkin describió favorablemente el equilibrio de biosorción en comparación con los modelos de Langmuir y Freundlich.

Otra de las investigaciones acerca de la remoción de colorantes básicos corresponde a la realizada por Atirah⁵⁸, quienes establecieron la influencia de variables como el tiempo de contacto, concentración inicial y dosis de biosorbente en el proceso de biosorción del VM sobre BC. Para este estudio los autores realizaron la caracterización del biosorbente por SEM y espectroscopia FTIR, ratificando la presencia de grupos funcionales que interactúan con el colorante durante el proceso de biosorción. Los resultados mostraron una disminución en el porcentaje de remoción del 99,63% al 98,6%, con el incremento de la concentración inicial del VM en el rango de 50 a 250 mg/L. Con respecto al tiempo de contacto, el equilibrio se obtuvo a los 90 min y la cantidad de colorante removido fue proporcional a la dosis de biosorbente empleado.

Lafi⁵⁹, evaluaron la capacidad de biosorción de la BC para la eliminación de los colorantes básicos azul de toluidina y Cristal Violeta (CV) en soluciones acuosas. Durante los experimentos de biosorción por lotes los autores estudiaron el efecto del tiempo de contacto, la concentración inicial del colorante, la dosis del biosorbente, la temperatura y el pH. Igualmente analizaron los resultados obtenidos de las metodologías de caracterización empleadas, como el PCC, titulaciones por el método de Boehm y la espectroscopia FTIR en el rango de 4000-400 cm^{-1} . El equilibrio del proceso de biosorción fue evaluado con los modelos de Langmuir, Freundlich, Temkin y Dubinin-Radushkevich, obteniendo un mejor ajuste con la isoterma de Langmuir y una capacidad máxima de biosorción de 142,5 mg/g para el azul de toluidina y 125 mg/g para el CV.

⁵⁸ ATIRAH, Siti; et al. Malachite Green Adsorption by Spent Coffee Grounds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 318, pp. 3 y 4.

⁵⁹ LAFI, Ridha; et al. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution. *Korean Journal Chemical Engineer*. 2014, Vol. 31, Nro, 12, pp. 2198.

2.3 REMOCIÓN DE COLORANTES ÁCIDOS

En cuanto a la remoción de colorantes ácidos Hincapié, Cardona y Ríos⁶⁰ estudiaron la influencia de la concentración inicial del colorante, el pH, la dosis de biosorbente y la temperatura en el comportamiento de biosorción del residuo de café para la remoción del colorante naranja de metilo (NM) a partir de experimentos por lotes. De acuerdo a los resultados alcanzados se obtuvo una mejor remoción a pH ácido, una dosis de biosorbente de 6 g/L y bajas temperaturas. El modelo de Langmuir describió el equilibrio del proceso de biosorción con una capacidad máxima de 1,3 mg/g. Por otra parte, para la caracterización del biosorbente se realizaron análisis termogravimétrico (TGA) y BET.

Roh⁶¹ compararon la capacidad de biosorción de la BC y la alúmina en la remoción del colorante ácido rojo 44. Para lo cual, los autores analizaron la carga superficial de los biosorbentes a partir de la variación del pH, obteniendo como resultado un valor en el PCC de 6 y 8,5 para la BC y la alúmina respectivamente. Determinando de esta manera, que una superficie cargada positivamente puede utilizarse para la remoción de adsorbatos que tienen grupos funcionales negativos, como es el caso del colorante ácido rojo 44. En cuanto al análisis del rendimiento en el proceso de biosorción, la alúmina presentó una mayor capacidad de biosorción (55,56 mg/g) frente a la de la BC que fue dos veces menor (27,78 mg/g). Sin embargo el proceso de biosorción se realizó en menos de una hora, por lo cual los autores concluyeron que la BC es un biosorbente alternativo para la remoción de contaminantes orgánicos.

Dai⁶² realizaron la caracterización de la BC para la remoción del colorante rojo neutro, obteniendo como resultado mayores cantidades de sitios ácidos (1,49 mmol/g) que de básicos (1,24 mmol/g) y un valor en el PCC de 5,6; lo cual indica que la carga superficial de la BC depende del pH de la solución. Asimismo determinaron mediante el análisis BET que la superficie microporosa del biosorbente juega un papel determinante en el proceso de biosorción del colorante.

⁶⁰HINCAPIÉ, Gina; CARDONA, Sebastián y RÍOS, Luis. Estudio termodinámico de la adsorción de un colorante azóico por medio de un residuo lignocelulósico en medio acuoso. *Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte*. 2018, Vol. 36, Nro. 1, pp. 98. ISSN 0122-3461.

⁶¹ROH, Jinkyu; et al. Waste coffee-grounds as potential biosorbents for removal of acid dye 44 from aqueous solution. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2012, Vol. 29, Nro. 7, pp. 905 y 907

⁶²DAI, Yingjie; et al. Kinetic and Equilibrium Studies of Neutral Red Adsorption onto Spent Ground Coffee from Aqueous Solution. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2016, Vol. 38, Nro. 05, pp. 838 y 842.

2.4 REMOCIÓN DE COLORANTES REACTIVOS

Kyzas⁶³ en su investigación para la decoloración de aguas residuales provenientes de industrias textiles, realizó pruebas en modo discontinuo con el fin de comparar la remoción de los colorantes reactivos: remazol rojo, remazol amarillo y remazol azul en aguas residuales sintéticas y reales, utilizando BC griega como biosorbente. Los resultados obtenidos corresponden a un pH de 2 para aguas sintéticas; mientras que para aguas reales se experimentó a pH libre. Además los datos se ajustaron a los modelos de Langmuir, Freundlich y Langmuir- Freundlich, con una capacidad máxima de biosorción de 241 mg/g a un pH de 2 y 179 mg/g a un pH de 10. La caracterización de la BC constó del análisis del PCC, SEM, determinación de grupos funcionales y área de superficie específica.

2.5 BORRA DE CAFÉ MODIFICADA PARA LA REMOCIÓN DE COLORANTES

A través de los años se ha investigado la modificación química de los biosorbentes con el fin de comparar la capacidad de biosorción entre los biosorbentes modificados y los que no presentan alteraciones en su morfología y/o composición. Una de estas investigaciones corresponde a los autores Castellar⁶⁴, quienes estudiaron la biosorción del colorante azul directo 2 sobre BC mediante un sistema continuo. La BC sin tratamiento y modificada con H₃PO₄ se evaluó en una columna empacada, en la cual se analizó la incidencia de las variables: flujo volumétrico (2 y 4 cm³/min), concentración inicial (8 y 14 mg/L) y la altura del lecho (3 y 6 cm). La caracterización de la BC incluyó isoterma BET, así como la identificación de grupos funcionales mediante espectroscopia FTIR y la determinación de sitios ácidos y básicos por el método de Boehm. La capacidad máxima de biosorción aumentó a valores bajos de concentración inicial del colorante y flujo volumétrico, y a valores altos para la altura del lecho.

Torres y Vanegas⁶⁵, compararon la capacidad de biosorción de la corteza de naranja, el bagazo de caña de azúcar y la BC activada con H₃PO₄ para la remoción del colorante ácido azul brillante FCF. El estudio de biosorción se realizó mediante el método batch, evaluando las variables de tiempo de contacto, tamaño

⁶³KYZAS, George. A Decolorization Technique with Spent "Greek Coffee" Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. *Materials*. 2012, Vol. 5, Nro. 11, pp. 2069 y 2072.

⁶⁴CASTELLAR, Grey; et al. Adsorción del colorante azul directo 2 sobre borra de café en una columna de lecho fijo a escala laboratorio. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 2018, Vol. 21, Nro. 2, pp. 531 y 533.

⁶⁵TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p.7.

de partícula y pH, a una concentración de 100 mg/L y 1 g de cada biosorbente. El contenido de colorante removido por cada material se cuantificó por medio de espectrofotometría UV-Vis, alcanzando un porcentaje de remoción del 62,9% para el bagazo de caña, 95% para la corteza de naranja y 98,6% para la BC.

Según Reffas⁶⁶, realizaron la comparación entre el CA a partir de BC mediante activación ácida y el CA de tipo comercial para la biosorción del colorante ácido Nylosan rojo N-2RBL y el colorante básico AM. La activación del CA derivado de la BC se llevó a cabo con impregnaciones de H₃PO₄ al 30, 60, 120 y 180% p/p. Las pruebas de biosorción se desarrollaron en modo discontinuo, teniendo como parámetros: tiempo de contacto (24 h), temperatura (25°C), agitación (300 rpm), pH de 4 para el Nylosan rojo y pH de 6 para el AM. Los resultados mostraron que el CA comercial presentó una mayor biosorción en la remoción del AM (370,4 mg/g), en comparación al CA con impregnación del 180% p/p (181,8 mg/g). En cuanto a la activación del biosorbente, las impregnaciones menores al 120% de H₃PO₄ en peso, produjeron un material microporoso y de superficie ácida, mientras que a valores mayores de impregnación con H₃PO₄ se obtuvo un material carbonoso de superficie neutra y mesoporosa.

Namane⁶⁷, determinaron la capacidad de biosorción del CA derivado de la BC por activación química con H₃PO₄ y ZnCl₂ para la eliminación tanto de fenoles como de colorantes ácidos y básicos. El material carbonoso producido se comparó con un CA comercial a partir de experimentos por lotes. Los resultados mostraron que el CA producido tiene más afinidad por el colorante básico (amarillo básico); mientras que el CA de tipo comercial tuvo una mejor biosorción de fenoles y del colorante azul ácido.

Chiang, Chen y Lin⁶⁸ evidenciaron una prometedora aplicabilidad de los residuos de café como biosorbentes altamente efectivos, a partir de la fabricación de materiales carbonizados con CO₂ para la BC y la BC desmineralizada con HCl 0,1M. Estudiando el efecto de la concentración de los colorantes, el tiempo de contacto, el pH de biosorción y su cinética. Obteniendo como resultados una máxima capacidad de biosorción de 678 y 612 mg/g para los colorantes básicos

⁶⁶REFFAS, A; et al. Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, Vol. 175, Nro. 1-3, pp. 785 y 786.

⁶⁷NAMANE, A; et al. Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with ZnCl₂ and H₃PO₄. *Journal of Hazardous Materials*. 2005, Vol. 199, Nro. 1-3, pp. 190 y 193.

⁶⁸CHIANG, Chih; CHEN, Jian y LIN, Jarrn. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp. 103929.

AM y NM respectivamente, con el uso de la BC desmineralizada a 950°C. Además de un ajuste de los resultados al modelo de Langmuir y un modelo cinético de pseudo-segundo orden.

Por otro lado Jung⁶⁹, evaluaron la síntesis del CA derivado de residuos de café para la remoción del naranja ácido 7, usando diferentes cantidades de KOH como agente activador. Para analizar la influencia del KOH en la superficie del biosorbente se calculó el área de superficie específica, además del análisis de espectroscopia FTIR y SEM. La capacidad máxima de biosorción fue de 1222,5 mg/g correspondiente al modelo de isoterma de Sips para el CA con una concentración de 15 mg/L de KOH a un pH de 3. Los resultados obtenidos mostraron una mejor biosorción del colorante al aumentar la relación de activación con KOH.

Del mismo modo Pagalan⁷⁰, evaluaron el uso del CA derivado de la BC e impregnado con KOH, para la eliminación del colorante básico amarillo anilina. La caracterización realizada por microscopia electrónica de barrido mostró estructuras mesoporosas y microporositas generadas por la modificación con KOH en el material, lo que permitió un aumento en la capacidad de biosorción del CA. De igual manera, el análisis FTIR mostró que el CA es un biosorbente potencial debido a la presencia de varios grupos funcionales. Para alcanzar la máxima eficiencia en la remoción del colorante, se realizó un diseño central compuesto con los parámetros más influyentes, los cuales fueron: concentración inicial, dosis de biosorbente y tiempo de contacto. Obteniendo como resultado una remoción del 87,05% y una capacidad máxima de biosorción de 2,58 mg/g.

El trabajo realizado por Wen⁷¹ sobre la evaluación de materiales carbonosos elaborados con residuos de café y catalizados con FeCl₃ para la biosorción de los colorantes básicos AM, NM y rodamina B (RB), consistió en la preparación de CA utilizando diferentes cantidades de catalizador, con el objetivo de estudiar tanto la influencia de la temperatura de carbonización, como la cantidad empleada de catalizador sobre el rendimiento del biosorbente. De igual manera, la estructura de los biosorbentes se caracterizó por difracción de rayos X (XRD) y BET. Los datos

⁶⁹JUNG, Kyung; et al. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues. *Journal of Cleaner Production*. 2017, Vol. 166, pp. 363 y 367.

⁷⁰PAGALAN, Efren; et al. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye. *Industrial Crops & Products*. 2020, Vol. 145, pp. 111953.

⁷¹WEN, Xin; et al. Large-scale converting waste coffee grounds into functional carbon materials as high efficient adsorbent for organic dyes. *Bioresource Technology*. 2019, Vol. 272, pp. 92, 93 y 95.

experimentales mostraron una alta remoción de AM (653,6 mg/g), NM (465,8 mg/g) y RB (366,1 mg/g). Adicionalmente los autores concluyeron que los biosorbentes al ser magnetizados pueden separarse con un imán y reutilizarse varias veces.

En el estudio de Lafi, Montasser y Hafiane⁷², el CA preparado a partir de residuos de café modificados con acetato de potasio y carbonizados a 450°C por 1 h, fue caracterizado a partir de los métodos de BET, FTIR, PCC y SEM. Asimismo evaluaron el efecto de diferentes parámetros como el pH, el tiempo de contacto, la concentración inicial del colorante y la dosis de biosorbente, además de las isotermas de biosorción en un sistema por lotes. Indicando una capacidad máxima de biosorción de 90,90 mg/g ajustada al modelo de Langmuir, a un pH de 3, un tiempo de 180 min, una dosis de biosorbente de 4 g/L y una concentración de 120 mg/L para el colorante ácido rojo congo (RC).

Por su parte Safarik⁷³, evaluaron la BC modificada magnéticamente para la biosorción de diferentes tipos de colorantes (CV, VM, RC, marrón Bismarck Y, safranina O, negro amido 10B y naranja acridina). La modificación consistió en sumergir la BC en una solución de fluido magnético con el fin de precipitar las nanopartículas magnéticas en la superficie del biosorbente. El proceso de biosorción se describió adecuadamente con la isoterma de Langmuir, alcanzando una mayor capacidad de biosorción para el naranja acridina (73,4 mg/g). De esta manera, se concluyó que la BC modificada magnéticamente es un biosorbente alternativo para la remoción de colorantes.

Otros autores como Hirata⁷⁴, produjeron un material carbonoso a partir de BC para la remoción de los colorantes básicos (AM y violeta genciana) y del colorante ácido naranja II. El material fue carbonizado mediante tratamiento con microondas en periodos de 7, 9 y 12 min. Los colorantes básicos se removieron en su totalidad en las tres muestras del biosorbente, lo que indica una mejor interacción entre los colorantes y la superficie del material carbonoso. Finalmente los autores concluyeron que la carbonización de desechos orgánicos mediante el tratamiento

⁷²LAFI, Ridha; MONTASSER, Imed y HAFIANE, Amor. Adsorption of Congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration. *Adsorption Science & Technology*. 2019, Vol. 37, Nro. 1-2, pp. 162, 163 y 169.

⁷³SAFARIK, Ivo; et al. Magnetically modified spent coffee Grounds for dyes removal. *European Food Research and Technology*. 2012, Vol. 234, Nro. 2, pp. 347 y 348.

⁷⁴HIRATA, Mizuho; et al. Adsorption of dyes onto carbonaceous materials produced from coffee Grounds by microwave treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002, Vol. 254, Nro.1, pp. 17, 18 y 19.

con microondas puede ser útil, al reducir costos de energía e impactos en el medio ambiente.

Pavlovic⁷⁵, investigaron el efecto de la dosis de biosorbente, concentración inicial del colorante, tiempo de agitación, pH de la solución y tiempo de activación realizada por un horno microondas doméstico para la BC con extracción de los compuestos polifenólicos. Adicionalmente evaluaron tanto el porcentaje de remoción, como la capacidad de biosorción del colorante básico CV. Los resultados de los experimentos arrojaron un pH de 6, una dosis de 15 g/L de biosorbente, 250 mg/L de concentración inicial y una velocidad de biosorción alrededor de 15 min. Logrando obtener un porcentaje de remoción del 95% y una capacidad máxima de biosorción de 36,82 mg/g ajustada al modelo de Freundlich.

Rattanapan, Srikran y Kongsune⁷⁶ estudiaron la capacidad de biosorción del CA obtenido con residuos de café modificados con HNO₃ para la remoción del colorante ácido NM. El material biosorbente se caracterizó mediante PCC, espectroscopia FTIR y SEM. Por otra parte, los estudios de biosorción se realizaron por medio de experimentos en discontinuo, en los cuales se evaluó el pH, el tiempo de contacto, la dosis de biosorbente y la temperatura. De acuerdo a los resultados arrojados por los experimentos, se obtuvo una máxima capacidad de biosorción de 658 mg/g a un pH de 3, concentración de NM de 300 mg/L, temperatura de 30°C, tiempo de contacto 90 minutos y 0,05 g del carbón activado. El modelo que más se ajustó a los datos experimentales corresponde a la isoterma de Freundlich lo que indica la heterogeneidad entre el biosorbente y la cobertura multicapa del colorante.

Así como se ha estudiado la modificación de biosorbentes, también se presentan investigaciones sobre la obtención de biosorbentes compuestos. Nitayaphat⁷⁷ estudió el uso potencial de perlas compuestas de quitosano y BC para la remoción del colorante rojo reactivo 52. Para tal fin, el autor preparó perlas compuestas variando las cantidades de quitosano/BC (100/0, 90/10, 70/30, 60/40 y 50/50). Asimismo analizó la influencia de parámetros como la concentración inicial, el tiempo de contacto y el pH. Los resultados mostraron valores mayores de remoción con las perlas de relación másica 60/40, además de determinar la

⁷⁵PAVLOVIC, Marija; et al. Rapid cationic dye adsorption on polyphenol-extracted coffee grounds-A response surface methodology approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014, Vol. 45, Nro. 4, pp. 1691.

⁷⁶RATTANAPAN, Supaporn; SRIKRAM, Jiraporn y KOGSUNE, Panita. Adsorptive of methylene orange on coffee grounds activated carbon. *Energy Procedia*. 2017, Vol. 138. pp. 949 y 953.

⁷⁷NITAYAPHAT, Walaikorn. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye. *Materials Today: Proceedings*. 2017, Vol. 4, pp. 6275 y 6280.

influencia del pH como uno de los factores más importantes que afectan la capacidad de biosorción; alcanzando un porcentaje máximo de remoción con un pH de 4. Por otra parte, el equilibrio del proceso se evaluó con las isotermas de Langmuir y Freundlich, evidenciando un mejor ajuste al primer modelo con una capacidad máxima de biosorción de 4,27 mg/g.

Jung⁷⁸, evaluaron perlas compuestas de CA derivado de la BC y alginato de calcio para la biosorción del colorante básico AM y naranja ácido 7. Los experimentos de biosorción se llevaron a cabo variando los valores del pH entre 3 y 11, obteniendo como resultado un porcentaje de remoción del 99,6% para el AM a un pH de 10 y del 97,6 % para el naranja ácido 7 a un pH de 3, al igual que una capacidad de biosorción de 75,2 mg/g y 73,5 mg/g respectivamente. Los datos se evaluaron con tres modelos de isotermas de biosorción, siendo la isoterma de Sips la que presentó mejor ajuste con capacidades máximas de biosorción de 986,8 mg/g para el AM y de 665,9 mg/g para el naranja ácido 7. Los autores concluyeron que las perlas compuestas poseen una superficie heterogénea.

Wong⁷⁹ investigaron la efectividad de modificar la BC con polietilenimina para la remoción del negro reactivo 5 y RC. La capacidad de biosorción máxima corresponde al negro reactivo 5 con 77,52 mg/g, mientras que la del RC fue de 34,36 mg/g. De acuerdo a los resultados obtenidos, se evidencia una mejora en la superficie del biosorbente modificado al aumentar los porcentajes de remoción e incrementar el rendimiento de los biosorbentes.

En cuanto a Ovando⁸⁰, la preparación del compuesto de BC recubierto con nanopartículas esféricas de polipirrol, presentó una alta capacidad de biosorción del colorante RB (50,59 mg/g) a pH básico, temperatura ambiente y concentración inicial de 200 mg/L del colorante. Igualmente el material fue caracterizado mediante los métodos de SEM, PCC, espectroscopia FTIR y espectrofotometría UV-VIS. Identificando una reducción en los poros de la superficie por la presencia de las nanopartículas del polipirrol, un espectro FTIR similar a la BC y un PCC de 3,2.

⁷⁸JUNG, Kyung; et al. Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue. *Bioresource Technology*. 2016, Vol. 219, pp. 187, 189 y 192

⁷⁹WONG, Syieluing; et al. Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific reports*. 2020, Vol. 10, Nro. 1, pp. 1 y 10.

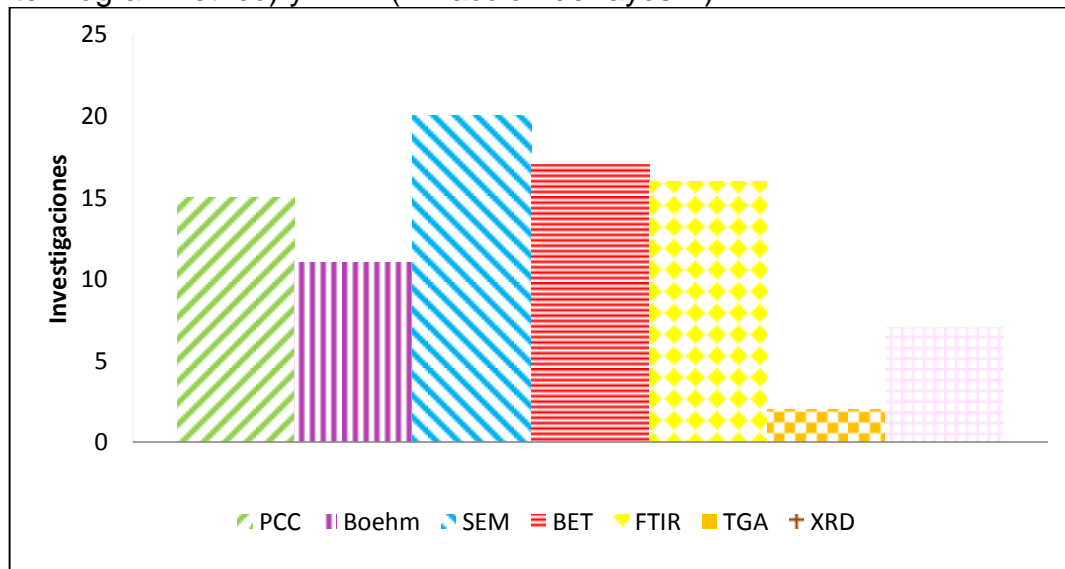
⁸⁰OVANDO, Víctor; et al. A semi-conducting polypyrrole/coffee Grounds waste composite for rhodamine B dye adsorption. *Iranian Polymer Journal*. 2018, Vol. 27, pp. 171 y 179

Son numerosas las investigaciones publicadas sobre el uso de BC para la remoción de colorantes sintéticos en el agua, cuya tendencia actual en los últimos años se relaciona directamente a la modificación de esta biomasa, con el fin de mejorar las propiedades biosortivas. Adicionalmente se identificaron los factores más influyentes como la adecuación de la materia prima, el uso de agentes que modifican la BC y las condiciones de operación como el pH, la concentración del colorante, la dosis de biosorbente, el tiempo de contacto, el tamaño de partícula y la temperatura. Las cuales afectan la capacidad de biosorción y el porcentaje de remoción de los colorantes sintéticos.

3. METODOLOGÍAS USADAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ

Conocer las propiedades de los biosorbentes es uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta para la biosorción de contaminantes, razón por la cual se realiza la caracterización del material para obtener información sobre su estructura, morfología y composición. Por lo anterior, se presentan las técnicas de caracterización empleadas en la BC y la BC modificada para la remoción de colorantes, a partir de un levantamiento de información en un diagrama de barras como se muestra en la Figura 6, identificando que las metodologías más usadas son PCC, SEM, espectroscopia FTIR e isothermas BET.

Figura 6. Tendencia de las metodologías usadas para la caracterización de la BC, PCC (Punto de carga cero), Boehm (Titulación ácido base por el método de Boehm), SEM (microscopía electrónica de barrido), BET (isothermas de biosorción de Brunauer, Emmett y Teller), FTIR (espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier), TGA (Análisis termogravimetrico) y XRD (Difracción de rayos X)



Fuente: elaboración propia

3.1 PUNTO DE CARGA CERO

El punto de carga cero (PCC), según Amaringo y Hormaza, “se define como el valor del pH donde la carga neta total (externa e interna) de las partículas sobre la superficie del material biosorbente es neutra, es decir, el número de sitios

positivos y negativos es igual⁸¹. Este método que establece la distribución de las cargas, permite dar información del intervalo del pH más apropiado para alcanzar una remoción efectiva de un contaminante de naturaleza aniónica o catiónica⁸². Por tal motivo, si el pH de una solución está por encima del PCC, la superficie tendrá una carga negativa neta y una mayor capacidad de intercambiar cationes, por el contrario si su pH está por debajo del PCC, la carga será positiva y predominará la retención de aniones⁸³. Algunas investigaciones relacionadas al estudio de la BC y la BC modificada para la remoción de colorantes sintéticos en el agua estudiaron el PCC, por ser un valor determinante en el proceso de biosorción⁸⁴, como se ilustra en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores medidos del PCC presente en diferentes estudios

Biosorbente	PCC	Referencias*
BC	4,37	Benmaamar, Z
BC	3,47	Ramos, Jaidith
BC	5,6	Dai, Yingjie
BC	3,2-3,4	Kyzas, George; Lazaridis, Nikolaos y Mitropoulos, Athanassios
BC	5,5	Lafi, Ridha
BC	3,4-3,6	Franca, Adriana; Oliveira, Leandro y Ferreira, Mauro
BC	3,3-3,5	Kyzas, George
BC	3,5	Shen, Kai y Gondal, M.A

Fuente: elaboración propia

⁸¹AMARINGO, Fredy y HORMAZA, Angelina. Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 2013, Vol. 4, Nro. 2, pp. 29.

⁸²Ibíd., p. 29.

⁸³APPEL, Chip; et al. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma*. 2003, Vol. 113, pp. 86.

⁸⁴OMENAT, Delia. Modificación química de carbones activados con ácidos minerales. Universidad de Extremadura, 2016. p. 62.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

Tabla 5. (Continuación)

Biosorbente	PCC	Referencias*
BC activada con H ₃ PO ₄	3,7-3,6-3,9-7,4 y 9,8	Reffas, A
BC activada con KOH	8,67	Jung, Kyung-Won
Compuesto de alginato de calcio con CA de BC activada con KOH	7,6	Jung, Kyung-Won
Perlas compuestas de quitosano con BC	6,47	Nitayaphat, Walaikorn
Compuesto de BC con polietilenimina	8,57	Wong, Syieluing

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a lo expuesto, se evidencia que el PCC de la BC sin ningún tipo de modificación oscila entre 3,2-5,6 por la presencia de ácidos clorogénicos y ácidos grasos propios de la naturaleza ácida del café⁸⁵, como se expone anteriormente en la Tabla 5. Donde la carga superficial de la BC puede tener cargas positivas con iones H⁺ o negativas con iones OH⁻ dependiendo del pH de la solución⁸⁶. De igual forma se muestra una variación en los valores del PCC de las diferentes investigaciones, por la influencia de factores tales como el origen del grano de café, el método de procesamiento posterior a la cosecha y las especies existentes⁸⁷.

⁸⁵ARGEÑAL, Wesling, ESPINOZA, Alicia y MORENO, Valeska. Determinación de parámetros físicos y químicos en café molido. León, Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-LEÓN, 2015. p. 56.

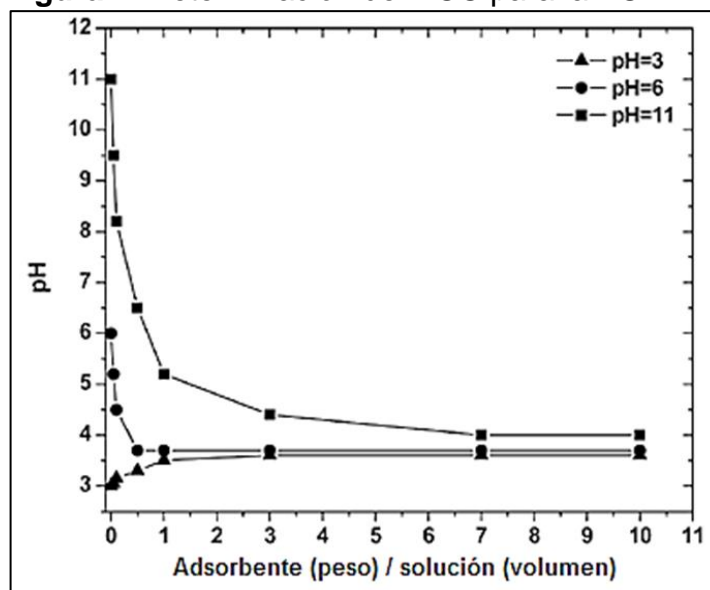
⁸⁶DAI. Kinetic and Equilibrium Studies of Neutral Red Adsorption onto Spent Ground Coffee from Aqueous Solution Op. Cit., p. 838.

⁸⁷BROLLO, G; CAPPUCCIO, R y NAVARINI, L. Acidity in coffee: Bridging the gap between chemistry and psychophysics. 22nd International Conference on coffee Science, Capinas. 2008, pp. 270.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

En cuanto a las investigaciones de Kyzas⁸⁸, Kyzas⁸⁹ y Franca⁹⁰, que a diferencia del resto de los estudios, presentaron un rango en el PCC de la BC como se muestra en la Tabla 5, debido a que evaluaron diferentes cantidades del biosorbente (0,05%, 0,1%, 0,5%, 1,0%, 3,0%, 7,0% y 10,0% p/p) en 20 mL de tres soluciones acuosas con distintos valores de pH (3, 6 y 11) como se ilustra en la Figura 7, determinando el PCC como el valor de pH convergente de la curva de masa versus el pH medido del biosorbente, después de las 24 h de agitación en la solución.

Figura 7. Determinación del PCC para la BC



Fuente: KYZAS, George Z. A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. *Materials*. 2012, Vol. 5, Nro. 11, pp. 2077

El estudio realizado por Reffas⁹¹, presentó un PCC entre 3,7-3,9 por el contenido de grupos fenólicos y carboxílicos de la BC impregnada con 30, 60 y 120% de H₃PO₄ en peso. Sin embargo el incremento de impregnación de H₃PO₄ con 180% en peso, generó una disminución de los grupos lactónicos y carboxílicos y un aumento en el grupo carbonilo. Según las investigaciones “Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from

⁸⁸ KYZAS. A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. Op. Cit.

⁸⁹KYZAS. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach Op. Cit., p. 149.

⁹⁰ FRANCA. Op. Cit.

⁹¹REFFAS. Op. Cit., p. 783 Y 784

extracted coffee residues” y “Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue”, presentaron un PCC de 8,67 y de 7,6 respectivamente para la BC modificada con KOH^{92 93}, como resultado del aumento de grupos básicos en el material⁹⁴.

En cuanto a la investigación realizada por Nitayaphat⁹⁵ se muestra un valor menor del compuesto entre quitosano/BC (6,47) con respecto al PCC del quitosano (7,12), indicando el contenido de grupos funcionales ácidos en el compuesto, que favorece la biosorción de los colorantes aniónicos. Con respecto a la investigación de Wong⁹⁶, se evidencia un aumento en el PCC por la modificación de la BC con polietilenimina, incrementando el número de cargas positivas de la superficie.

3.2 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM por sus siglas en inglés) es una de las técnicas que permite la visualización y caracterización de materiales mediante la incidencia de un haz de electrones sobre la muestra que detecta, procesa y visualiza las señales generadas por la interacción de los mismos⁹⁷. Proporcionando información del relieve, el tamaño, la textura y la morfología superficial de una muestra, con una mayor resolución y mejor profundidad con respecto a los microscopios ópticos⁹⁸. Para esto, es necesario asegurar que la muestra se encuentre limpia y seca. En caso tal de que la muestra no tenga una buena conductividad (muestras orgánicas, inorgánicas, vidrios y polímeros), se recurre a un recubrimiento con una delgada capa de oro o carbón en la superficie

⁹²JUNG. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues Op. Cit., p. 363.

⁹³JUNG. Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue Op. Cit., p. 189.

⁹⁴CARVAJAL, Ana. Modificación química de carbones activados y su efecto en la adsorción de compuestos fenólicos. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, 2014. p. 51.

⁹⁵NITAYAPHAT. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye Op. Cit., p. 6278.

⁹⁶WONG. Op. Cit., p. 2

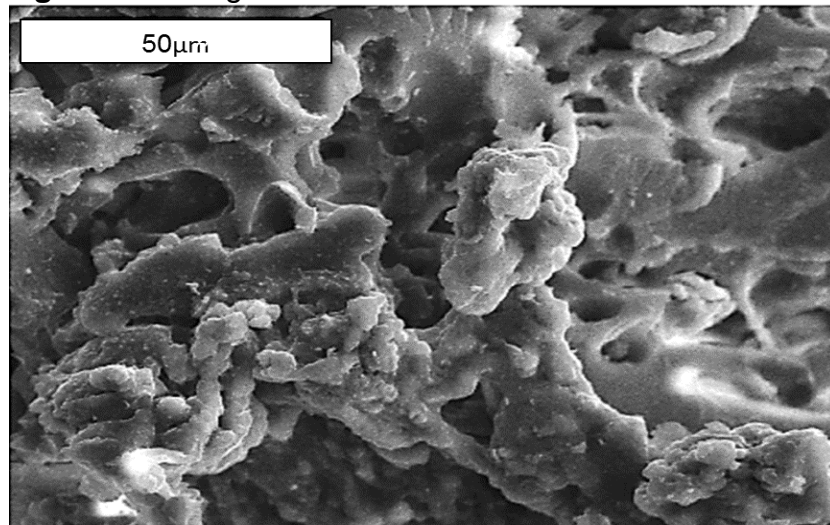
⁹⁷IPOHORSKI, Miguel y BOZZANO, Patricia. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e investigación*. 2013, Vol. 63, Nro. 3, pp. 45.

⁹⁸TORRES, Tatiana y MORA, Claudia. Aplicación de la microscopía electrónica de barrido en la evaluación de dos materias primas cosméticas como restauradora de la cutícula. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*. 2010, Vol. 39, Nro. 1. pp. 9. ISSN 0034-7418.

del material, para evitar la acumulación de las cargas de la muestra que pueden llegar a desviar completamente el haz de electrones incidentes⁹⁹.

Éste método usado en las investigaciones relacionadas al estudio de la BC o la BC modificada para la remoción de colorantes sintéticos en el agua, ilustraron diferentes escenarios en las micrografías SEM. De acuerdo a Kyzas¹⁰⁰, la superficie de la BC preparada con un recubrimiento de carbón, presentó una superficie rugosa llena de cavidades de diferentes tamaños, como se muestra en la Figura 8. Según Atirah, “Estas cavidades pueden caracterizarse como canales en la superficie de los materiales de café no tratados que son útiles para la biosorción de colorantes”¹⁰¹. Igualmente Kopsidas¹⁰² evidenció una textura superficial relativamente rugosa e irregular, que justo después del proceso de biosorción del colorante AM se da un efecto de hinchamiento en las partículas lignocelulósicas (Figura 9). Así como Nitayaphat¹⁰³, quienes presentaron una superficie heterogénea de la BC que permite la biosorción física del colorante AM, gracias a las fuerzas electrostáticas que atrapan la molécula en los poros del material.

Figura 8. Micrografía SEM de la BC



Fuente: KYZAS, George Z. A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. *Materials*. 2012, Vol. 5, Nro. 11, pp. 2076.

⁹⁹IPOHORSKI. Op. Cit., p. 50.

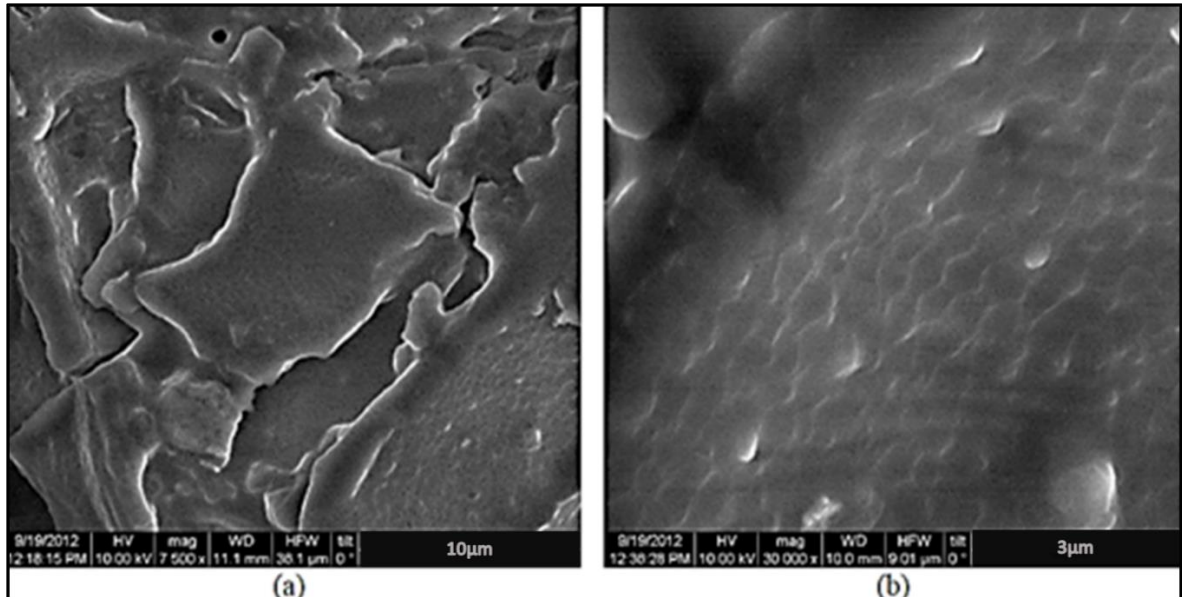
¹⁰⁰KYZAS. A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. Op. Cit., p. 2073 y 2076.

¹⁰¹ATIRAH. Op. Cit., p. 3.

¹⁰²KOPSIDAS. Op. Cit., p. 488.

¹⁰³NITAYAPHAT, Walaikorn; et al. Removal of methylene blue from aqueous solution by coffee residues. *Chiang Mai Journal of Science*. 2015, Vol. 42, Nro. 2, pp. 410

Figura 9. Micrográficas SEM de la BC (a) antes y (b) después del proceso de biosorción del colorante AM



Fuente: KOPSIDAS, Odysseas. Batch studies for methylene blue removal and recovery by untreated coffee residues. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 2017, Vol. 6, pp. 489.

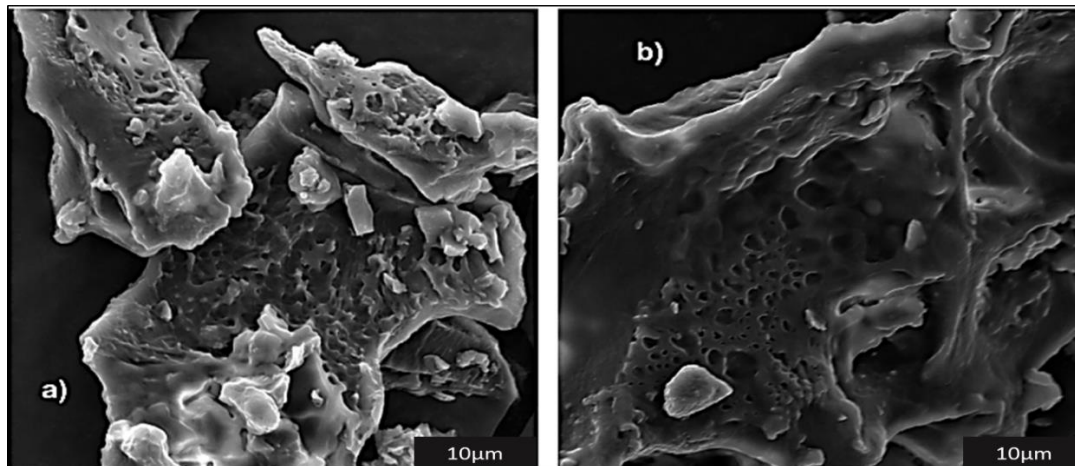
En cuanto a los autores Pavlovic¹⁰⁴, mostraron una superficie con protuberancias irregulares y depresiones en la BC, cuyos poros se encuentran distribuidos aleatoriamente (Figura 10a). Con respecto a la micrografía de la Figura 10b, se evidencia un cambio en la superficie de la BC generada por la unión del colorante CV en los poros de la superficie, activada de forma física a partir de microondas.

Para Ovando¹⁰⁵, los resultados obtenidos en la caracterización SEM de las Figuras 11a y 11b con dos aumentos de imagen diferente, corresponden a las muestras de BC lavadas con agua destilada y con soluciones acuosas de 0,1N de NaOH y HCl para las Figuras 11c y 11d. Exponiendo una superficie plana con granos porosos entre 200-600 μm para el lavado con agua destilada, que no se ve afectada después de los tratamientos básicos y ácidos en su superficie, al extraerse sólo los compuestos solubles.

¹⁰⁴ PAVLOVIC. Op. Cit., p. 1698

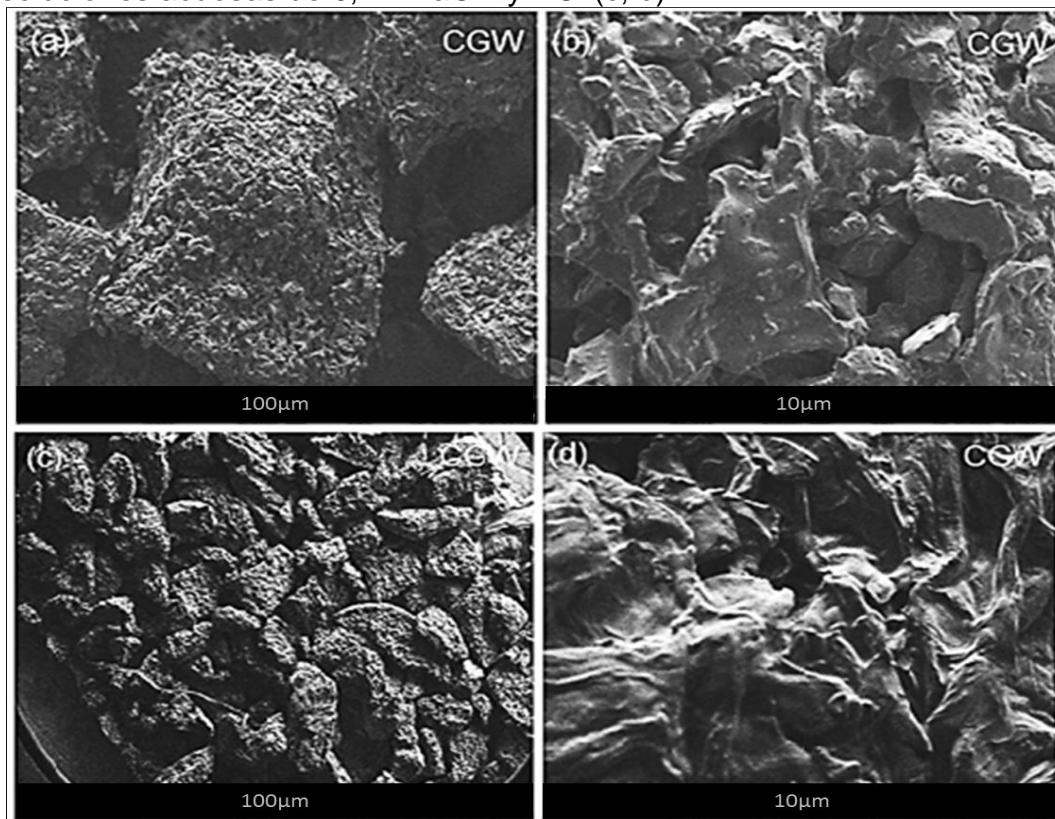
¹⁰⁵ OVANDO. Op. Cit., p. 177

Figura 10. Micrografías SEM de la BC (a) antes y (b) después del proceso de biosorción del colorante CV



Fuente: PAVLOVIC, Marija; et al. Rapid cationic dye adsorption on polyphenol-extracted coffee grounds-A response surface methodology approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014, Vol. 45, Nro. 4, pp. 1699.

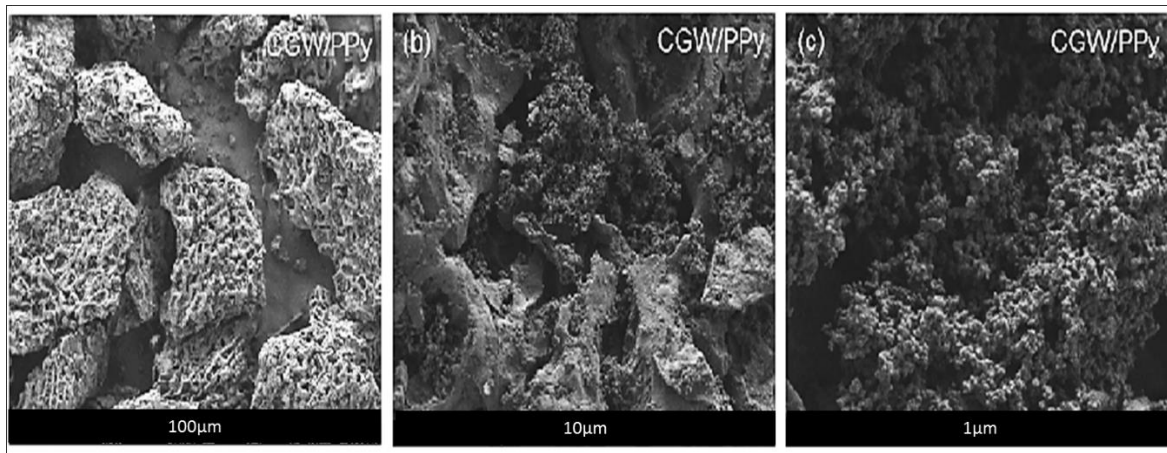
Figura 11. Micrografías SEM de la BC lavada con agua destilada (a, b) y con soluciones acuosas de 0,1N NaOH y HCl (c, d)



Fuente: OVANDO, Víctor; et al. A semi-conducting polypyrrole/coffee Grounds waste composite for rhodamine B dye adsorption. *Iranian Polymer Journal*. 2018, Vol. 27, pp. 177.

En cuanto al compuesto de BC con polipirrol (Figura 12), se muestra una diferencia en la superficie porosa llena de nanopartículas esféricas con tamaños en el intervalo de 0,1-0,25 μm , generados por la polimerización del polipirrol en la lignina y la celulosa de la BC¹⁰⁶.

Figura 12. Micrografías SEM de la BC modificada con polipirrol a diferentes aumentos



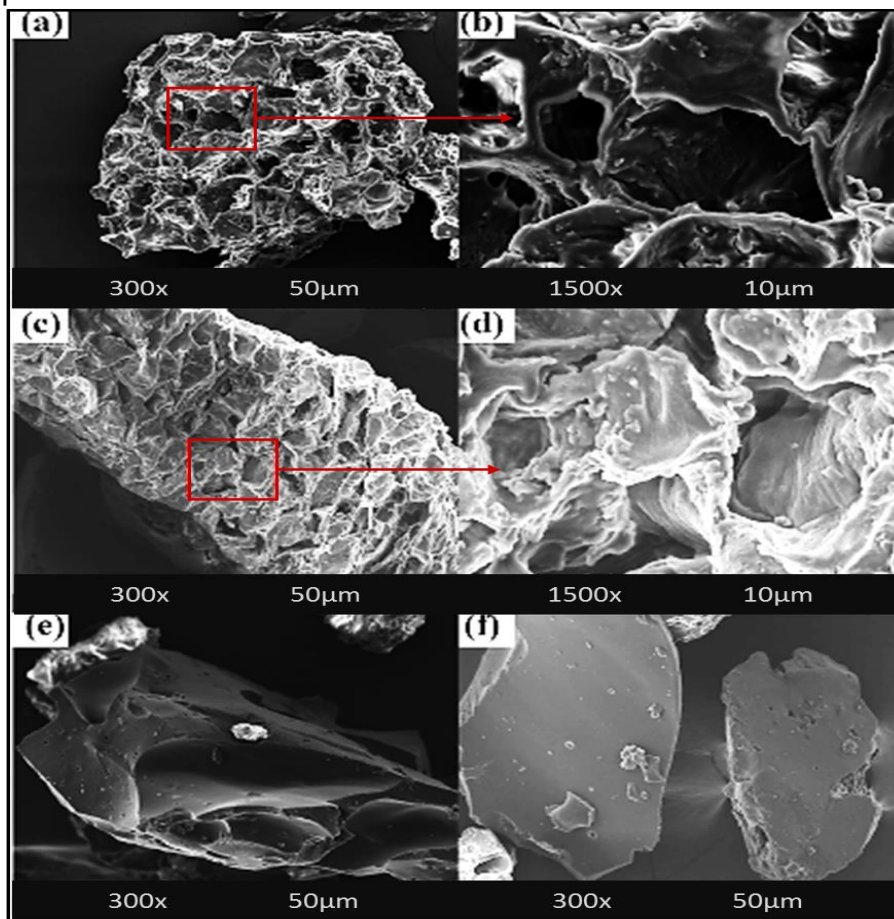
Fuente: OVANDO, Víctor; et al. A semi-conducting polypyrrole/coffee Grounds waste composite for rhodamine B dye adsorption. *Iranian Polymer Journal*. 2018, Vol. 27, pp. 178.

La investigación de Wong¹⁰⁷, para la BC sin modificación resulta ser similar a las tendencias de otros trabajos, presentando rugosidades en la superficie del material (Figura 13a y 13b). A pesar de esto, la BC modificada con polietilenimina exhibe una estructura más densa y lisa, con la presencia de algunos poros como se muestra en las Figuras 13c y 13d. Adicionalmente los autores mencionan la presencia de partículas inorgánicas extrañas con formas irregulares y bordes, al ser partículas insolubles en agua y estables a los tratamientos térmicos con temperaturas hasta los 100°C como se evidencia en las micrografías para la BC (Figura 13e) y el compuesto de BC con polietilenimina (Figura 13f). Sin embargo los autores no realizaron estudios sobre el origen de esas partículas.

¹⁰⁶Ibíd.

¹⁰⁷WONG. Op. Cit., p. 4

Figura 13. Micrografías SEM de la BC en (a) 300x y (b) 1500x, compuesto de BC con polietilenimina en (c) 300x y d) 1500x y partículas extrañas en (e) la BC y (f) compuesto de BC y polietilenimina

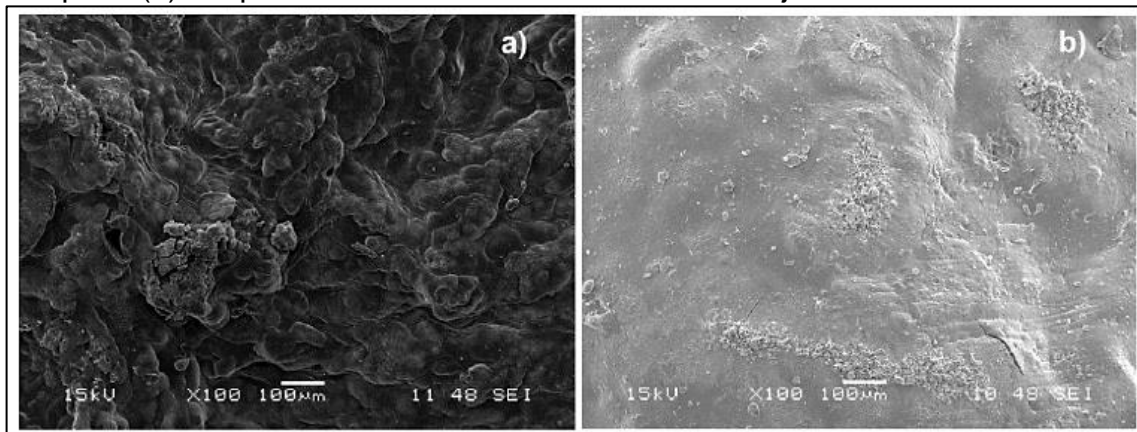


Fuente: WONG, Syieluing; et al. Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific reports*. 2020, Vol. 10, Nro. 1, pp. 5.

Con lo que respecta a las características morfológicas de las perlas de BC compuestas con quitosano, Nitayaphat¹⁰⁸ advierte la necesidad de preparar las muestras con un recubrimiento de oro en su superficie previamente a su visualización SEM. Como resultado se presenta una superficie rugosa con una variedad de cavidades para el compuesto de BC con quitosano Figura 14a, que al contacto con el colorante rojo reactivo 152, se evidencia una disminución en la cantidad de poros heterogéneos, al ser adheridos en la superficie del compuesto (Figura 14b).

¹⁰⁸NITAYAPHAT. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye Op. Cit., p. 6278.

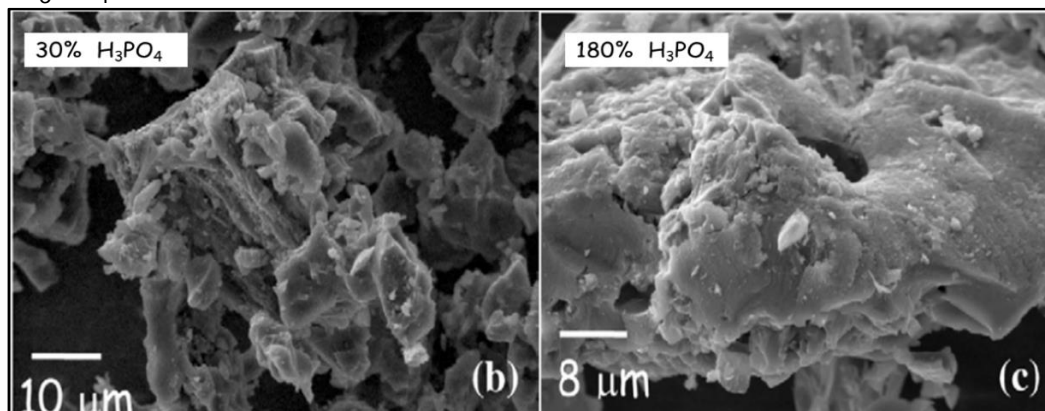
Figura 14. Micrográficas SEM del compuesto de quitosano/BC antes (a) y después (b) del proceso de biosorción del colorante rojo reactivo 152



Fuente: NITAYAPHAT, Walaikorn. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye. *Materials Today: Proceedings*. 2017, Vol. 4, pp. 6278.

Rattanapan, Srikrum y Kongsune¹⁰⁹ identificaron en la micrografía SEM de la BC impregnada con 25% v/v HNO₃ una porosidad pronunciada alrededor de la superficie del material. En cuanto a la investigación de Reffas¹¹⁰, la BC activada con 30, 60 y 120% en peso de H₃PO₄, exhibieron una superficie similar, relativamente heterogénea (Figura 15b). Sin embargo la impregnación con 180% de H₃PO₄ en la BC, muestra algunos macroporos de 2-5µm de diámetro, además de una superficie más lisa ilustrada en la Figura 15c.

Figura 15. Micrográficas SEM de la BC con 30% (b) y BC con 180% (c) de H₃PO₄



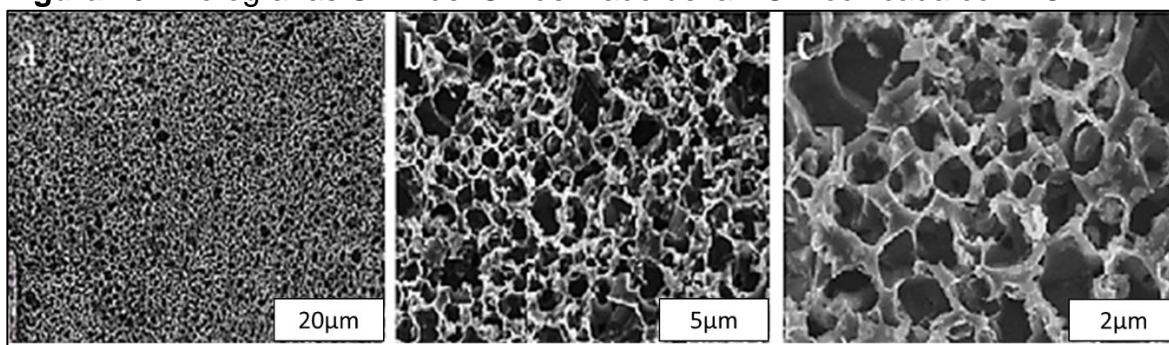
Fuente: REFFAS, A; et al. Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, Vol. 175, Nro. 1-3, pp. 784.

¹⁰⁹RATTANAPAN. Op. Cit., p. 950

¹¹⁰REFFAS. Op. Cit., p. 783

En relación con el estudio de Pagalan¹¹¹, expusieron la presencia de mesoporos y microporos en la superficie, indicando que el KOH permitió la modificación química de la estructura física de la biomasa, como se muestra en las micrografías a 20 μm (Figura 16a), 5 μm (Figura 16b) y 2 μm (Figura 16c). Del mismo modo los autores mencionan que la forma de panal de la BC modificada con KOH 1M determina la calidad del material biosorbente, al permitir una mayor atracción del colorante en la superficie de este. Igualmente Jung¹¹², mencionan que la superficie del material con una concentración de 15 mol/L de KOH en la BC presenta una estructura más heterogénea, con nuevas cavidades y poros ensanchados en comparación al material que no contiene KOH.

Figura 16. Micrografías SEM del CA derivado de la BC modificada con KOH



Fuente: PAGALAN; et al. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye. *Industrial Crops & Products*. 2020, Vol. 145, pp. 111953.

3.3 BRUNAUER-EMMETT-TELLER

La isoterma de Brunauer-Emmett-Teller (BET) es una de las metodologías de caracterización que estudia el área de superficie y la distribución del tamaño de los poros, a partir de la biosorción física de un gas inerte¹¹³. El cual se determina bajo el cálculo del número de moléculas de gas requeridas para cubrir el material desgasificado con una única capa¹¹⁴, mediante la adecuación del biosorbente con bombas de vacío y aumentos de temperatura para desorber la humedad y otras

¹¹¹PAGALAN. Op. Cit., p. 111953.

¹¹²JUNG. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues Op. Cit., p. 362.

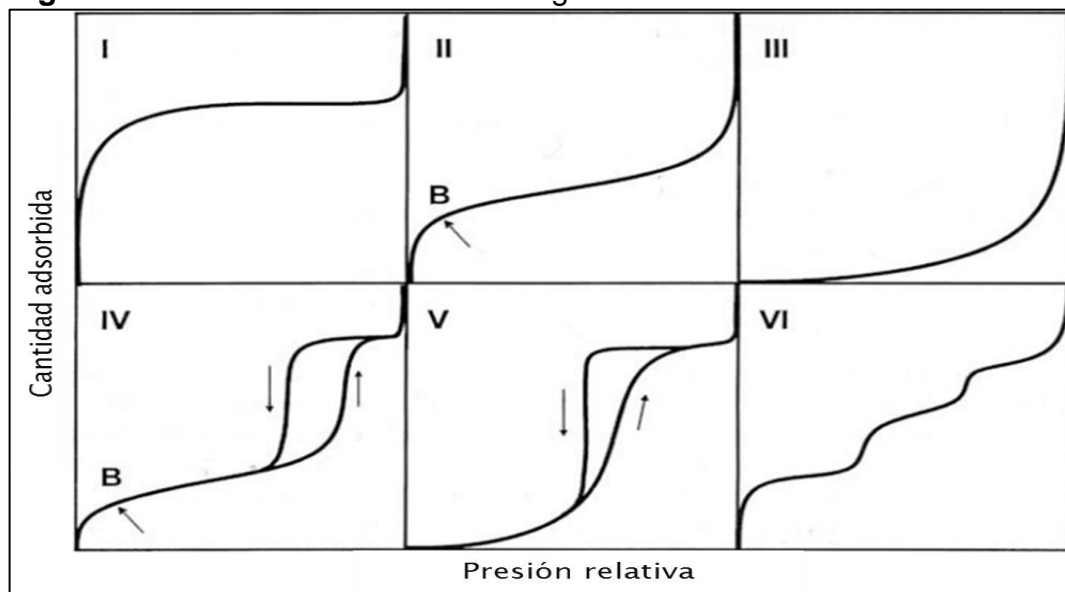
¹¹³SOLIS, Ludibeth. Evaluación del fosfato de hierro (III) como material reactivo para la remoción de uranio en agua. Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México, 2004. p. 65.

¹¹⁴ZUBIETA. Carolina E. Materiales mesoporosos ordenados en la eliminación de contaminantes. en efluentes textiles. Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur, 2010. p. 19.

especies volátiles de la muestra que interfieren con el análisis¹¹⁵. Una vez la muestra es adecuada y enfriada a temperatura de N₂ líquido (77 K), se libera de forma gradual una cantidad de gas conocido a bajas presiones y a temperatura constante, hasta formar una monocapa en la superficie del material que permite el cálculo del área de superficie¹¹⁶. Asimismo esta técnica permite cuantificar y recopilar la información mediante isothermas BET, que representan la cantidad de gas adsorbido en función de la presión relativa una vez se da la adsorción de las moléculas adicionales del gas en múltiples capas, hasta llegar a la presión de saturación de los poros del biosorbente, independientemente de cualquier aumento adicional en la presión del gas¹¹⁷.

Por consiguiente la existencia de diferentes comportamientos de las isothermas de biosorción física de gases se agrupan de acuerdo a las seis categorías de la IUPAC. De las cuales las cinco primeras fueron propuestas por Brunauer S., Deming L., Deming W. y Teller E (BDDT); siendo posteriormente incluida la isoterma tipo VI¹¹⁸, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Isothermas de biosorción según la clasificación IUPAC



Fuente: HORACIO, Raúl. Caracterización de medios porosos y proceso percolativos y de transporte. San Luis, Argentina: Universidad de San Luis, 2002. p. 21.

¹¹⁵RAJA, Pavan y BARRON, Andrew. Physical methods in chemistry and nano Science. [en línea]. openstax cnx. [Consultado 12, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/dogeMUD>

¹¹⁶Ibíd.

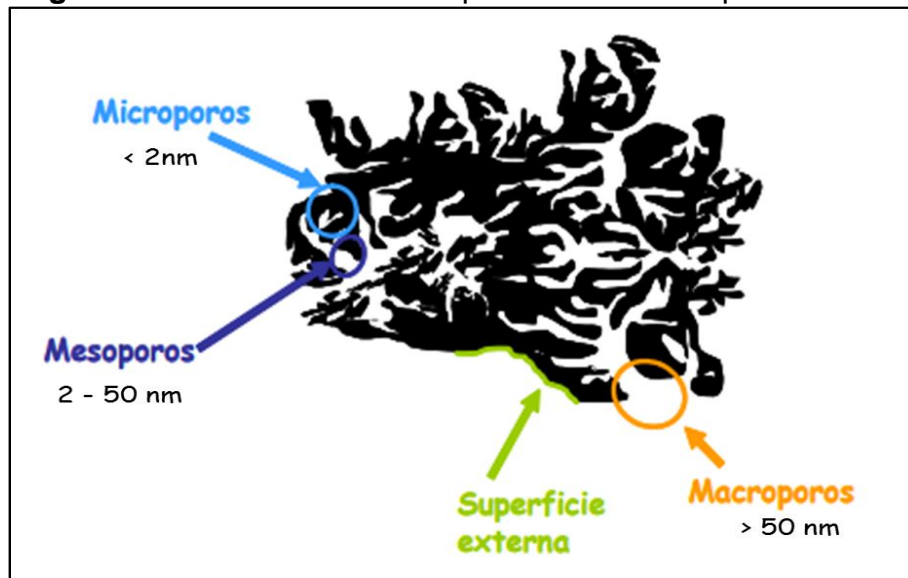
¹¹⁷Ibíd.

¹¹⁸GALLEGO, Jessica. Empleo de biosorbentes como aditivos en cementos: caracterización y aplicaciones en la eliminación de contaminantes ambientales. Universidad de Oviedo, 2014. p. 26.

El tipo I es una isoterma característica de materiales microporosos que tienen superficies externas relativamente pequeñas. El tipo II se asocia a los materiales sólidos no porosos o macroporosos, este tipo de gráfica se divide en dos secciones, siendo la letra B el punto donde se ha dado la formación completa de la monocapa y a su vez el inicio para la formación de la biosorción por multicapas. El tipo III indica una tendencia de interacciones débiles entre el adsorbato y el biosorbente, que por lo general resultan ser isothermas poco comunes de encontrar. El tipo IV hace referencia a los biosorbentes mesoporosos normalmente usados en las industrias, cuya curvatura está dada por la condensación capilar. El tipo V, al igual que el comportamiento del tipo III, resulta de interacciones débiles entre el adsorbato y el biosorbente, pero pueden estar presentes en algunos biosorbentes porosos. El tipo VI o isoterma escalonada es una de las isothermas menos comunes, que se da por una biosorción en multicapas de una superficie no porosa, que depende del sistema y la temperatura¹¹⁹.

Adicionalmente Dubini propuso una clasificación de los poros según sus dimensiones que ha sido adoptada por la IUPAC (Figura 18). Clasificadas como microporos (poros de diámetro menor a 2nm), mesoporos (poros entre 2-50 nm de diámetro) y macroporos (poros con diámetros mayores a 50 nm)¹²⁰.

Figura 18. Clasificación de los poros establecida por la IUPAC



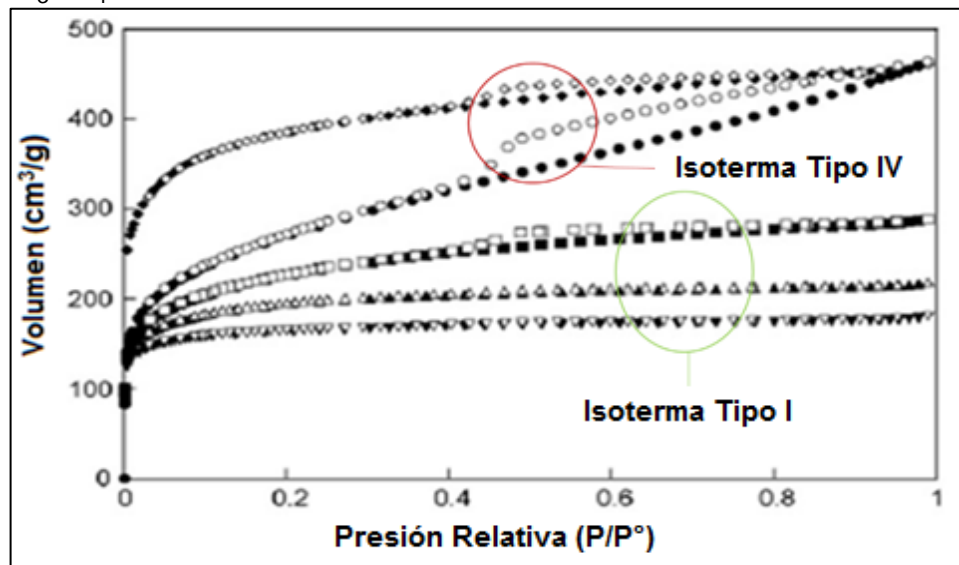
Fuente: GALLEGO, Jessica. Empleo de biosorbentes como aditivos en cementos: caracterización y aplicaciones en la eliminación de contaminantes ambientales. Universidad de Oviedo, 2014. p. 24.

¹¹⁹ZUBIETA. Op. Cit., p. 19 y 20.

¹²⁰GALLEGO. Op. Cit., p. 23.

En relación a lo mencionado, diversas investigaciones han expuesto diferentes resultados en las isotermas de biosorción de BET para la BC y la BC modificada como biosorbente para la remoción de colorantes sintéticos disueltos en el agua. Tal es el caso de Dai¹²¹, quienes identificaron un área de superficie de 422 m²/g y un volumen de poro de 0,26 cm³/g para la BC, donde cerca del 65% está representado como microporos, además de mesoporos y macroporos para el 35% restante. Por otro lado Reffas¹²², expusieron diferentes tendencias en las muestras carbonizadas de BC impregnadas con 30, 60, 120 y 180% en peso de H₃PO₄, en comparación al CA (Figura 19). En primera instancia la BC con 30% de H₃PO₄ exhibió una isoterma tipo I con la presencia de microporos en el material, que al igual que las muestras con 60 y 120% de H₃PO₄, muestran tendencias semejantes pero con la presencia de microporos más anchos. En cuanto a la BC con 180% de H₃PO₄ y el CA comercial, corresponden a sólidos micro y mesoporosos para la isoterma tipo IV.

Figura 19. Isotermas de biosorción BET para el CA comercial (♦) y la BC modificada con 30%(▼), 60%(▲), 120% (■) y 180%(●) de H₃PO₄



Fuente: REFFAS, A; et al. Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, Vol. 175, Nro. 1-3, pp. 782.

Igualmente encontraron aumentos ligeros en el área de superficie y el volumen total de poros a bajas relaciones de impregnación (30 y 60% de H₃PO₄) e

¹²¹DAI. Kinetic and Equilibrium Studies of Neutral Red Adsorption onto Spent Ground Coffee from Aqueous Solution Op. Cit., p. 838.

¹²² REFFAS. Op. Cit., p. 781 y 782.

incrementos abruptos por encima del 120% en peso de H_3PO_4 , gracias a la despolimerización de la celulosa de la BC. Sin embargo estos valores resultan ser más bajos que los obtenidos en el CA comercial (Tabla 6)¹²³. Igualmente Castellar¹²⁴¹²⁵ en sus dos investigaciones “Biosorción del colorante azul directo 2 sobre BC en una columna de lecho fijo a escala de laboratorio” y “Aprovechamiento de la borra de café para la producción de carbón activado y su evaluación en la biosorción del colorante azul marino directo”, evidenciaron que la preparación de la BC con 20%, 40% y 60% de H_3PO_4 , resultan ser insuficientes para obtener un área de superficie semejante al CA comercial. A pesar de esto, la existencia de una mejor distribución del tamaño microporoso del sólido genera un incremento en la biosorción de los colorantes a bajas concentraciones.

Tabla 6. Área de superficie y volumen de los poros para la BC carbonizada y modificada con H_3PO_4

Muestras	Área de superficie (m ² /g)	Volumen total de los poros (cm ³ /g)
Borra de café con 30% de H_3PO_4 en peso	514	0,280
Borra de café con 60% de H_3PO_4 en peso	618	0,338
Borra de café con 120% de H_3PO_4 en peso	745	0,446
Borra de café con 180% de H_3PO_4 en peso	925	0,718
Carbón activado comercial	1440	0,713

Fuente: elaboración propia con base en: REFFAS, A; et al. Carbons prepared from coffee grounds by H_3PO_4 activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, Vol. 175, Nro. 1-3, pp. 783.

Asimismo Namane¹²⁶ evidenciaron un menor volumen de poro y un área de superficie para la BC carbonizada y modificada con $ZnCl_2$ y H_3PO_4 en comparación al CA comercial. Presentando valores de 0,95 cm³/g y 640 m²/g respectivamente, con una mayor cantidad de mesoporos en la superficie del material estudiado. En cuanto a la investigación de Chiang, Chen y Lin¹²⁷, la caracterización por el método de BET fue realizado para dos casos, el primero de ellos corresponde a la BC carbonizada a diferentes temperaturas, el segundo hace referencia a la BC activada con HCl 1M y carbonizada en diferentes rangos de

¹²³Ibíd.

¹²⁴CASTELLAR. Adsorción del colorante azul directo 2 sobre borra de café en una columna de lecho fijo a escala laboratorio Op. Cit., p. 534 y 535

¹²⁵CASTELLAR, Grey; et al. Aprovechamiento de la borra de café para la producción de carbón activado y su evaluación en la adsorción del colorante azul marino directo. Memorias III seminario internacional de ciencias ambientales SUE-Caribe. 2017, pp. 44.

¹²⁶NAMANE. Op. Cit., p. 191.

¹²⁷CHIANG. Op. Cit., p. 103929.

temperatura. Por ende el aumento de la temperatura de activación cercana a los 650°C, incrementa el área de superficie de la BC según lo mencionado por los autores. No obstante la activación de la BC a 700°C generó una reducción significativa en el área de superficie y a su vez una menor porosidad en el material por la destrucción de la morfología textural en la BC (Tabla 7).

Tabla 7. Área de superficie y volumen de los poros para la BC carbonizada a diferentes temperaturas

Muestras	Área de superficie (m ² /g)	Volumen total de los poros (cm ³ /g)
Borra de café	0,5	-
Borra de café a 550°C	125,4	0,064
Borra de café a 600°C	155,2	0,084
Borra de café a 650°C	318,2	0,173
Borra de café a 700°C	177,4	0,098

Fuente: elaboración propia con base en: CHIANG, Chih; CHEN, Jian y LIN, Jarrn-Horng. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp.103929.

Además, los autores presentaron un incremento en el volumen total de los poros y del área de superficie a medida en que aumenta la temperatura de carbonización y la cantidad de HCl 1 M, como se ilustra en la Tabla 8. Donde los aumentos de temperatura por encima de los 900°C permiten un cambio en la estructura de los poros, pasando de microporos a mesoporos. Teniendo en cuenta que las muestras fueron desmineralizadas con HCl 1M antes de llevar a cabo la carbonización y activación¹²⁸

Tabla 8. Área de superficie y volumen de los poros para la BC carbonizada a diferentes temperaturas e impregnada con HCl 1 M

Muestras	Área de superficie (m ² /g)	Volumen total de los poros (cm ³ /g)
Borra de café con HCl	0,2	-
Borra de café a 700°C con HCl	406,4	0,214

Fuente: elaboración propia con base en: CHIANG, Chih; CHEN, Jian y LIN, Jarrn-Horng. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp.103929.

¹²⁸Ibíd.

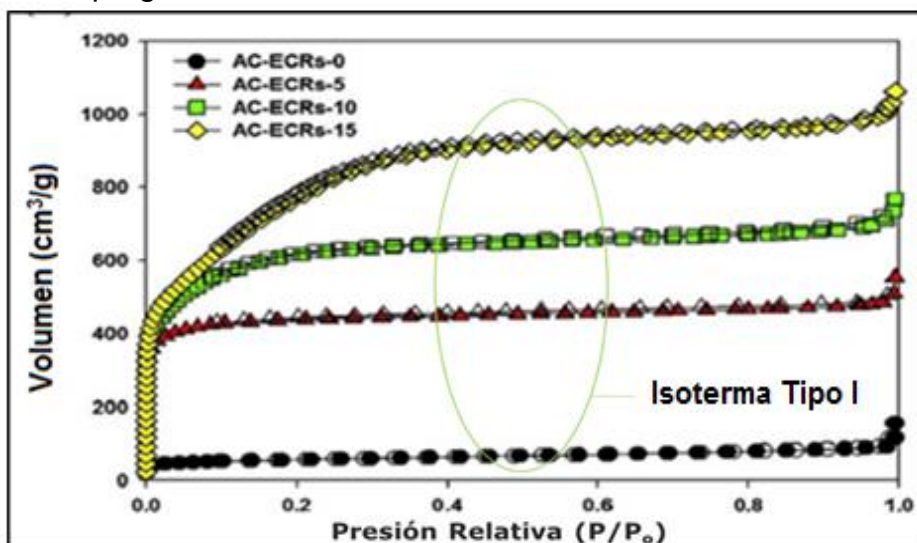
Tabla 8. (Continuación)

Muestras	Área de superficie (m ² /g)	Volumen total de los poros (cm ³ /g)
Borra de café a 850°C con HCl	907,0	0,478
Borra de café a 900°C con HCl	1277,5	0,634
Borra de café a 925°C con HCl	1800,6	0,952
Borra de café a 950°C con HCl	2407,8	1,281

Fuente: elaboración propia con base en: CHIANG, Chih; CHEN, Jian y LIN, Jarrn-Horng. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp.103929.

Por otro lado Jung¹²⁹, informaron que los carbones activados derivados de la BC con impregnaciones de 0, 5, 10, o 15 mol/L de KOH, tienen un comportamiento tipo I representativo de sólidos microporosos, como se muestra en la Figura 20. Adicionalmente los datos experimentales sugirieron un aumento en la porosidad debido al incremento en la impregnación de KOH, pasando de un área de superficie de 185,6 a 2745,7 m²/g y un volumen total de poro de 0,09 a 2,32 cm³/g para la BC y la BC modificada con 15 mol/L de KOH respectivamente.

Figura 20. Isotermas de biosorción BET para la BC carbonizada con impregnaciones de 0, 5, 10, o 15 mol/L de KOH



Fuente: JUNG, Kyung; et al. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues. *Journal of Cleaner Production*. 2017, Vol. 166, pp. 362.

¹²⁹JUNG. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues Op. Cit., p. 363.

Para Lafi, Montasser y Hafiane¹³⁰, el estudio del CA derivado de la BC modificada con CH₃CO₂K proporcionó un área de superficie de 219,69 m²/g y un volumen total de poro de 0,125 cm³/g relativamente altos, lo que facilita la difusión de una gran cantidad de moléculas del colorante en los microporos de la superficie del biosorbente.

Con respecto a los autores Wong¹³¹, ilustraron como el área de superficie para la BC resulta ser baja (1,92 m²/g) a pesar del tratamiento térmico realizado en comparación al CA comercial, como se muestra en la Tabla 9. Sin embargo el compuesto de BC con polietilenimina aumentó ligeramente el área de superficie gracias a los procesos repetitivos de lavado y secado durante la modificación, logrando eliminar las impurezas contenidas en la BC y aumentando así el área de mesoporos y microporos del compuesto. No obstante, los autores mencionan que las propiedades en la textura del material son insignificantes durante el proceso de biosorción, al obtener resultados inferiores para la BC compuesta con polietilenimina con respecto al CA a partir de otros residuos biológicos.

Tabla 9. Área de superficie para la BC compuesta con polietilenimina

Muestras	Área de superficie (m ² /g)
Borra de café	2,115
Compuesto borra de café con polietilenimina	4,997
Carbón activado comercial	1202,8

Fuente: elaboración propia con base en: WONG, Syieluing; et al. Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific reports*. 2020, Vol. 10, Nro. 1, pp. 4.

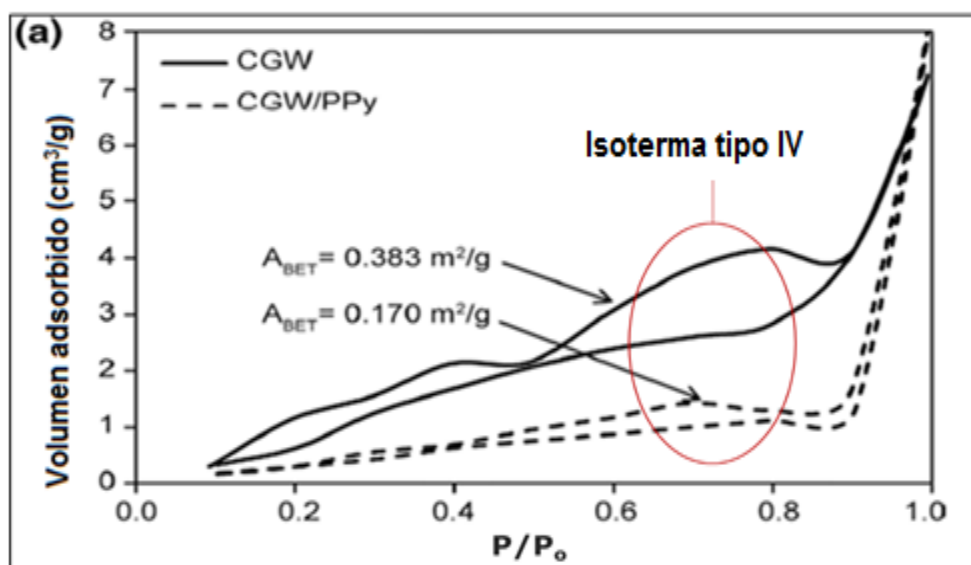
Según lo relacionado con los autores Ovando¹³², se expone una mayor porosidad de la BC en comparación a la BC compuesta con polipirrol, cuya histéresis en el proceso de biosorción de nitrógeno puede asociarse con respecto a la condensación capilar de estructuras mesoporosas que corresponde a la isoterma tipo IV. Presentando una disminución de 2,2 veces en el área para el compuesto de BC con polipirrol, por la disposición de las nanopartículas del mismo que recubren los poros de la biomasa. Formando de este modo nuevos poros relacionados a los espacios interparticulares del polipirrol, como se muestra en la Figura 21.

¹³⁰LAFI. Adsorption of Congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration. Op. Cit., p. 165.

¹³¹WONG. Op. Cit., p. 3 y 4.

¹³²OVANDO. Op. Cit., p. 176 y 177.

Figura 21. Isotermas de biosorción BET para la BC y la BC compuesta con polipirrol



Fuente: OVANDO, Víctor; et al. A semi-conducting polypyrrole/coffee Grounds waste composite for rhodamine B dye adsorption. *Iranian Polymer Journal*. 2018, Vol. 27, pp. 177

3.4 ESPECTROSCOPIA DE INFRARROJO POR TRANSFORMADA DE FOURIER

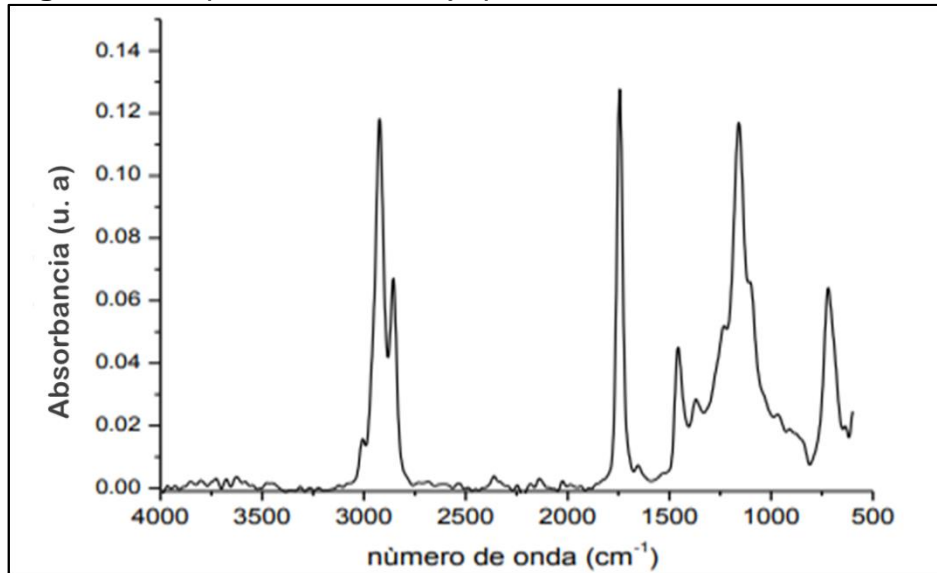
La Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) es una técnica que permite conocer la estructura atómica o molecular de un material, a partir del estudio de la absorción o emisión de la energía emitida por la interacción entre la radiación electromagnética y el material de estudio, manifestándose mediante bandas asociadas al movimiento vibracional de los enlaces moleculares generados por un cambio en el momento dipolar¹³³. Este método versátil y rápido se representa mediante una figura compuesta por bandas o picos, donde el eje de las abscisas presenta los valores de la longitud de onda de la luz infrarroja y las ordenadas hacen referencia a los valores de la intensidad de absorción o transmisión de la luz como se ilustra en las Figura 22 y 23¹³⁴. Cabe mencionar que la espectroscopia FTIR permite estudiar cualquier muestra independientemente

¹³³PIQUÉ, Teresa y VÁZQUEZ, Analía. Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y Cemento*. Investigación y desarrollo. 2012, Vol. 3, Nro. 2, pp. 63. ISSN 2007-3011.

¹³⁴MONDRAGÓN, Pedro. Principios de la espectroscopia infrarroja. En: *Espectroscopia de infrarrojo para todos*. 1 ed. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., 2017. 30.

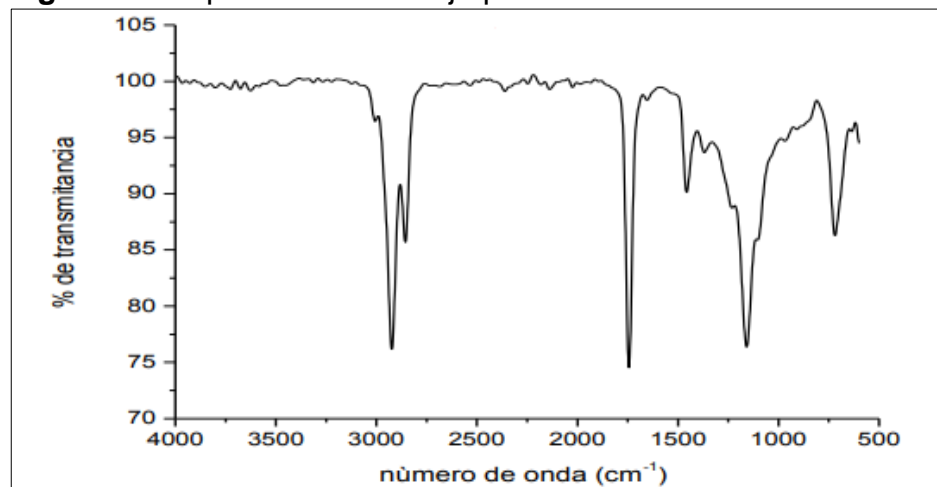
del estado en el que se encuentre, sea líquido, en pasta, polvo, disoluciones, fibras, films, gases o superficies¹³⁵.

Figura 22. Espectro de infrarrojo por absorbancia



Fuente: MONDRAGÓN, Pedro. Principios de la espectroscopia infrarroja. En: Espectroscopia de infrarrojo para todos. 1 ed. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., 2017. 32.

Figura 23. Espectro de infrarrojo por transmitancia



Fuente: MONDRAGÓN, Pedro. Principios de la espectroscopia infrarroja. En: Espectroscopia de infrarrojo para todos. 1 ed. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., 2017. 31.

¹³⁵SERRANO, José. Espectroscopia Infrarroja 1-Fundamentos. Universidad Politécnica de Cartagena, 2004, p. 2.

Por lo que respecta a la preparación del material se hace uso de haluros alcalinos como NaCl, KBr, KCl, entre otros; que permiten obtener una tableta transparente similar a un cristal cuando se somete a una presión adecuada. Una de las técnicas más populares en la preparación de muestras sólidas se da mediante la formación de pastillas de KBr a partir la mezcla de 100-300 mg de polvo fino junto con aproximadamente 1 mg o menos del biosorbente pulverizado¹³⁶. Posterior a esto se compacta la mezcla en un troquel a una presión de 700 kg/cm², consiguiendo un delgado disco transparente usado en la prueba de espectroscópica FTIR¹³⁷. Una vez registrado el espectro de la muestra se realiza la interpretación de las bandas o picos característicos, que brindan la información necesaria para la identificación de los grupos funcionales. Para ello se identifica la región conocida como frecuencias de grupo comprendida en el rango de 4000 a 1500 cm⁻¹, las cuales se interpretan según la recopilación de información de las tablas de frecuencias de grupo¹³⁸ como se muestra en el Anexo A. Como bien menciona Sierra “recogen el intervalo de frecuencias dentro del cual es posible encontrar una banda de adsorción para un determinado grupo funcional”¹³⁹. Con respecto a la región conocida como huella dactilar (comprendida entre 1500 y 600 cm⁻¹), se muestran cambios importantes en la distribución de las bandas por la presencia de diferentes vibraciones de enlace de difícil interpretación, sin embargo esta complejidad le brinda la singularidad de cada muestra evaluada¹⁴⁰.

De acuerdo a lo mencionado, la caracterización realizada por el método de espectroscopia FTIR ha permitido determinar los grupos funcionales característicos tanto de la BC como de la BC modificada como se muestra a continuación. Para Castellar¹⁴¹, los resultados del espectro FTIR de la BC muestran frecuencias del grupo funcional OH relacionadas a los alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos. Así como bandas de estiramiento de los grupos C-H y C=O propios de las de cetonas, aldehídos, lactonas y carboxilos. Del mismo modo los autores Atirah¹⁴², mencionan la presencia de grupos hidroxilos (O-H) y de alcanos (C-H) en las bandas de 3357,95 y de 2850-3000 cm⁻¹ en la superficie de la BC. Adicionalmente los picos a 1746 y 1662 cm⁻¹ representan el estiramiento para el grupo carboxilo (C=O) derivado de la xantina de la cafeína, además de la

¹³⁶Ibíd., p. 17 y 18.

¹³⁷Ibíd., p. 17 y 18.

¹³⁸MONDRAGÓN. Op. Cit., p. 54.

¹³⁹SIERRA, Isabel; et al. Fundamentos e instrumentación en espectroscopia de absorción en el infrarrojo. En: Análisis instrumental. 1 ed. España: netbiblo, 2010. 75.

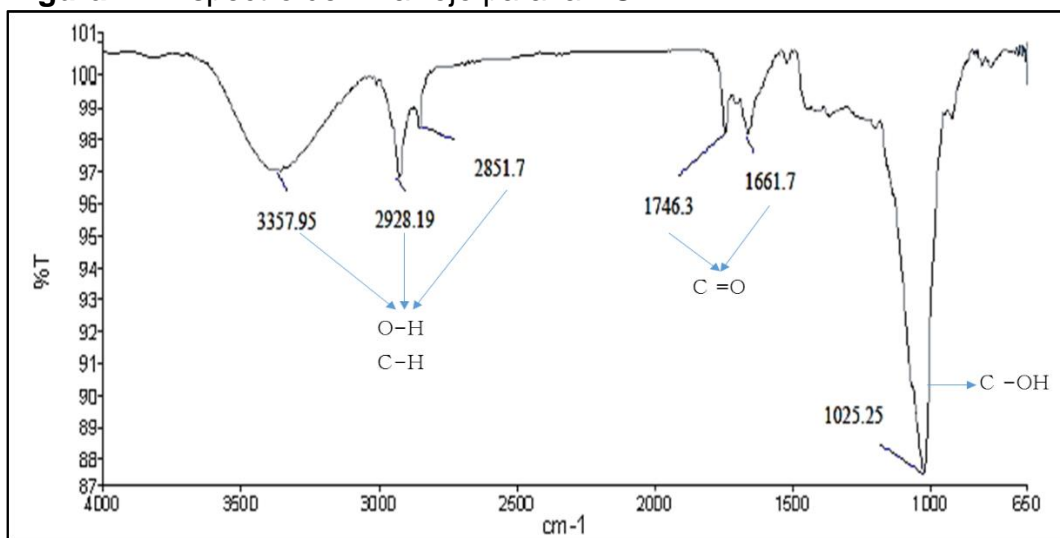
¹⁴⁰MONDRAGÓN. Op. Cit., p. 56.

¹⁴¹CASTELLAR. Aprovechamiento de la borra de café para la producción de carbón activado y su evaluación en la adsorción del colorante azul marino directo Op. Cit., p. 44.

¹⁴²ATIRAH. Op. Cit., p. 3.

presencia de un pico fuerte y agudo a una frecuencia de 1026 cm^{-1} relacionado al estiramiento (C-OH) del polisacárido de la BC (Figura 24). En cuanto a Nitayaphat¹⁴³, los autores presentaron los espectros de la BC antes y después del proceso de biosorción del AM, como se muestra en la Figura 25. Indicando la presencia de grupos CH₃ y CH₂ en las bandas de 2924, 2854, 1463 y 1377 cm^{-1} , además de un cambio en los estiramientos de banda de 3390 y 1651 cm^{-1} a 3396 y 1627 cm^{-1} para los grupos hidroxilos y carbonilo. Esto se debe la interacción de las moléculas del colorante catiónico en los sitios activos de la BC.

Figura 24. Espectro de infrarrojo para la BC



Fuente: ATIRAH, Siti; et al. Malachite Green Adsorption by Spent Coffee Grounds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 318, pp. 3.

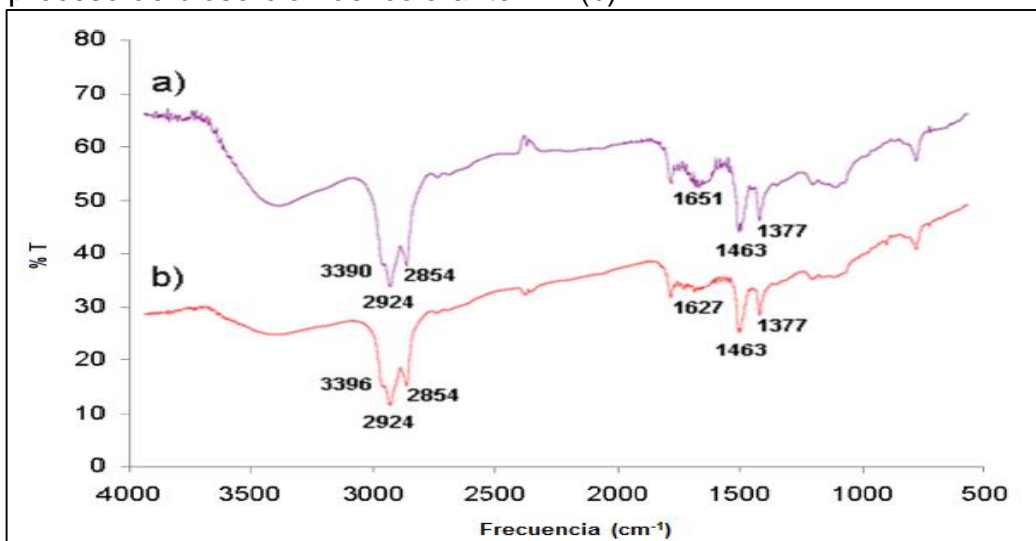
Para Pavlovic¹⁴⁴, los grupos funcionales de la BC antes y después de la biosorción del colorante CV fueron estimados por espectroscopia FTIR, en un rango de longitud de onda entre $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ a temperatura ambiente, con 0,6 mg de muestra y 200 mg de KBr. Ilustrando una amplia banda a $3200\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ con un máximo a $3432,72\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a grupos hidroxilo y agua adsorbida. Además de la presencia de grupos metileno (CH₂) y metilo (CH₃) para las bandas a 2924,84 y $2920,72\text{ cm}^{-1}$, involucrados en el proceso de biosorción del colorante CV, así como un estiramiento en la banda a 2853 cm^{-1} referente a un grupo metoxilo (C-H) en el anillo aromático y en los grupos metilo y metileno de las cadenas laterales. En cuanto al pico a 1450 cm^{-1} los autores exponen la presencia de CH₂ como de CH₃ o de grupos OH referentes a los fenoles de la BC y de la

¹⁴³NITAYAPHAT. Removal of methylene blue from aqueous solution by coffee residues Op. Cit., p. 409.

¹⁴⁴PAVLOVIC. Op. Cit., p. 1699.

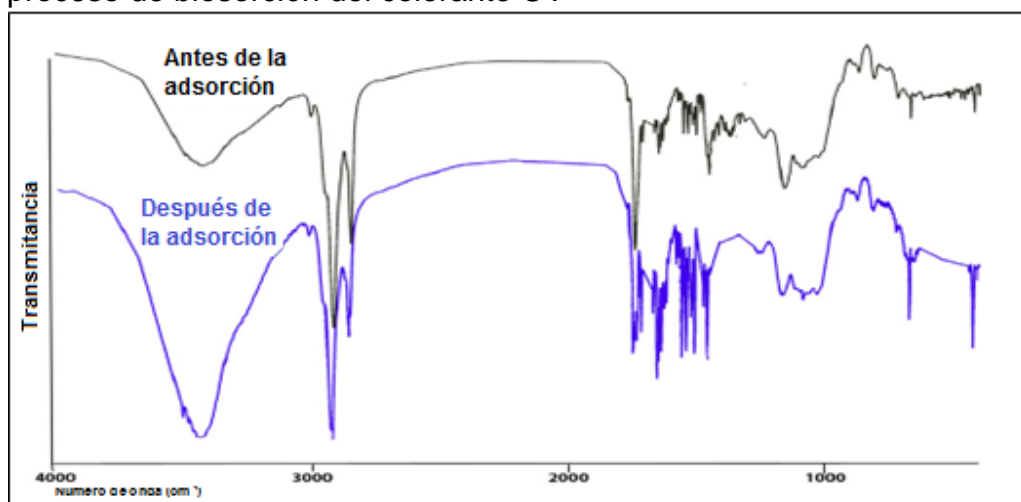
presencia de aceite en las bandas de 1100-1300 cm^{-1} . Adicionalmente después del proceso de biosorción se presenta la banda a 626 cm^{-1} en el espectro por la deformación de C-H en diferentes anillos de benceno sustituidos (Figura 26).

Figura 25. Espectro de infrarrojo para la BC antes (a) y después del proceso de biosorción del colorante AM (b)



Fuente: NITAYAPHAT, Walaikorn; et al. Removal of methylene blue from aqueous solution by coffee residues. *Chiang Mai Journal of Science*. 2015, Vol. 42, Nro. 2, pp. 410.

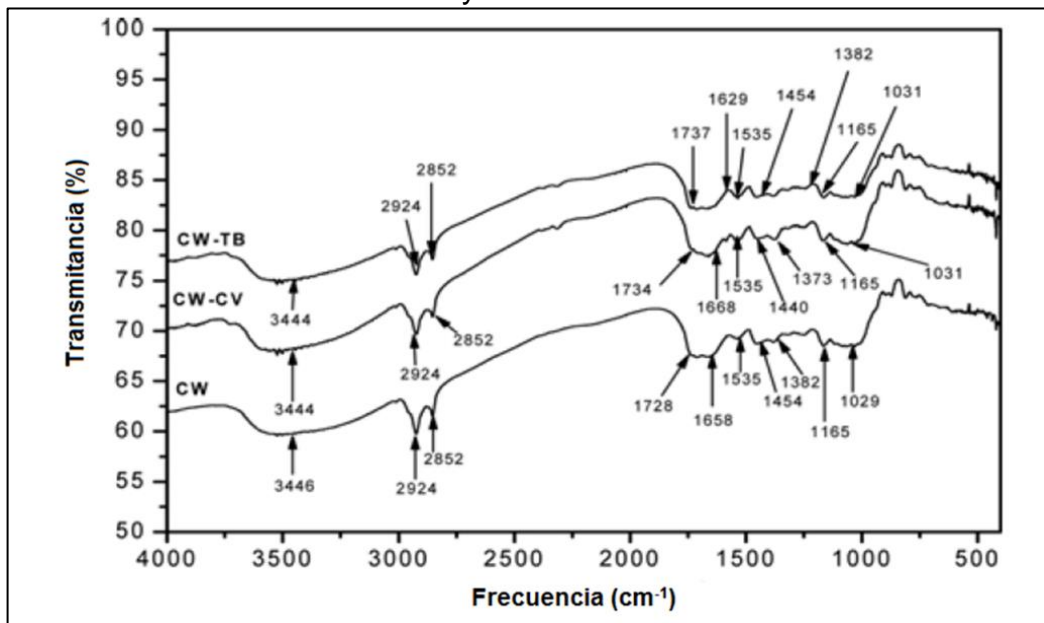
Figura 26. Espectro de infrarrojo para la BC antes y después del proceso de biosorción del colorante CV



Fuente: PAVLOVIC, Marija, et al. Rapid cationic dye adsorption on polyphenol-extracted coffee grounds-A response surface methodology approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014, Vol. 45, Nro. 4, pp.1699.

Asimismo Lafi¹⁴⁵, expusieron los espectros de infrarrojo de la BC antes y después del proceso de biosorción de los colorantes azul de toluidina y CV como se observa en la Figura 27, evidenciando en la banda de 3446 cm⁻¹ la presencia de grupos OH en la superficie de la BC como son alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos de la pectina, la celulosa y la lignina. Los picos a 2924 y 2852 cm⁻¹ corresponden a la vibración C-H, mientras que la frecuencia a 1728 cm⁻¹ resulta de los enlaces carboxilo derivados de los xantenos como la cafeína. Las bandas a 1658, 1535 y 1454 cm⁻¹ indican la presencia de grupos carboxilos y amino. Además se presenta el estiramiento de COO⁻ a 1382 cm⁻¹, al igual que los estiramientos C-O del grupo éter y del grupo carboxilo en las bandas de 1165 y 1029 cm⁻¹. Igualmente se puede observar una similitud en los espectros con respecto a la BC, como resultado de la unión de los colorantes con los grupos funcionales O-H, C=O, COO, C-O, N-H y C-O relacionados al mecanismo de biosorción como se muestra en la Tabla 10.

Figura 27. Espectro FTIR de la BC antes y después de la biosorción de los colorantes azul de toluidina y CV



Fuente: LAFI, Ridha; et al. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution. *Korean Journal Chemical Engineer.* 2014, Vol. 31, Nro, 12, pp.2205

¹⁴⁵LAFI. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution Op. Cit., p. 2204 y 2205.

Tabla 10. Grupos funcionales de las diferentes bandas para la BC antes y después del proceso de biosorción de los colorantes CV y azul de toluidina

BC	BC después de adsorber el colorante azul de toluidina	BC después de adsorber el colorante CV	Grupo funcional
	Frecuencia (cm⁻¹)		
3446	3444	3444	OH
2924	2924	2924	C-H
2852	2852	2852	CH ₂
1728	1734	1737	C=O
1658	1668	1629	COO
1535	1535	1535	N-H
1454	1440	1456	CO
1382	1373	1382	COO-
1165	1165	1165	C-O-C
1029	1031	1031	C-O

Fuente: elaboración propia con base en: LAFI, Ridha; et al. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution. *Korean Journal Chemical Engineer.* 2014, Vol. 31, Nro, 12, pp. 2205 y 2206.

En lo que concierne a la investigación de Rattanapan, Srikrum y Kongsune¹⁴⁶, se presentaron los espectros tanto de la BC como de la BC carbonizada y activada con HNO₃. Donde los espectros para la BC a 3260, 3050, 2925, 1741, 1638, 1240, 1151, 1055, 871 y 807 cm⁻¹ mostraron la presencia de grupos funcionales como hidroxilos, fenoles, olefinas, ésteres y éteres. Sin embargo, la BC carbonizada y activada con HNO₃, generó la pérdida de los compuestos volátiles y la aparición del estiramiento del alquino, dando lugar a una modificación superficial eficiente como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Grupos funcionales de las diferentes bandas para la BC y la BC carbonizada y modificada con HNO₃

BC	BC modificada con HNO ₃	Grupo funcional
	Frecuencia (cm⁻¹)	
3260	-	O-H
3050	-	=C-H
2925, 2855	-	C-H
-	2115	C=C
1741	-	C=O
1638	-	C=C

Fuente: elaboración propia con base en: RATTANAPAN, Supaporn; SRIKRUM, Jiraporn y KOGSUNE, Panita. Adsorptive of methylene orange on coffee grounds activated carbon. *Energy Procedia.* 2017, Vol. 138. pp. 951.

¹⁴⁶RATTANAPAN. Op. Cit., p. 951.

Tabla 11. (Continuación)

BC	BC modificada con HNO ₃	Grupo funcional
Frecuencia (cm ⁻¹)		
1455	-	C-H
1240, 1151, 1055	1210, 1068	C-O
871, 807	875	C=C-H

Fuente: elaboración propia con base en: RATTANAPAN, Supaporn; SRIKRAM, Jiraporn y KOGSUNE, Panita. Adsorptive of methylene orange on coffee grounds activated carbon. *Energy Procedia*. 2017, Vol. 138. pp. 951.

Los espectros infrarrojos para los autores Reffas¹⁴⁷, fueron evaluados a temperatura ambiente en un rango de 400-4000 cm⁻¹ de longitud de onda, usando 200 mg de KBr y 0,6 mg para el CA comercial y las muestras carbonizadas e impregnadas con 30%, 60%, 120% y 180% de H₃PO₄ en peso. Como resultado se concluye que la caracterización IR generó cambios en la BC por el aumento en la relación de impregnación con H₃PO₄, desarrollando grupos carbonilo en la banda a 1700 cm⁻¹ y aumentando los grupos fosforosos en las bandas a 1070-1080 cm⁻¹. Asimismo las muestras modificadas con 120 y 180% de H₃PO₄ presentaron una disminución en la banda de C-O-C a 1050 cm⁻¹ y en la intensidad de la banda O-H a 1450 cm⁻¹, por la reducción de grupos carboxílicos y fenólicos (Tabla 12).

Tabla 12. Características de los grupos funcionales para el CA y la BC modificada con 30%, 60%, 120% y 180% de H₃PO₄

Grupos funcionales meq/g	BC 30% de H ₃ PO ₄	BC 60% de H ₃ PO ₄	BC 120% de H ₃ PO ₄	BC 180% de H ₃ PO ₄	CA
Carboxílicos	0,466	0,390	0,266	0,266	0,000
Lactónicos	0,200	0,200	0,234	0,014	0,000
Fenólicos	0,709	0,700	1,033	0,786	0,416
Carbonilos	0,125	0,133	0,124	0,434	0,934

Fuente: elaboración propia con base en: REFFAS, A; et al. Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, Vol. 175, Nro. 1-3, pp. 783.

Por otro lado Pagalan¹⁴⁸, evidenciaron la presencia de grupos alcohol, hidroxilo, alcano, alqueno, alquino, aromático y éter para los diferentes picos de la BC carbonizada e impregnada con KOH como se muestra en la Tabla 13. Los picos a 1372,39 y 3342,25 cm⁻¹ mostraron la presencia de grupos hidroxilos y de grupos

¹⁴⁷REFFAS. Op. Cit., p. 785.

¹⁴⁸PAGALAN. Op. Cit., p. 111953.

alcanos en los picos 2927,94 y 729,09 cm^{-1} . Conjuntamente para las bandas a 1620,23 y 1462,07 cm^{-1} se relacionan a los alquenos y grupos aromáticos, así como la presencia de alquinos a 2100,50 cm^{-1} y de grupos éter en las bandas a 1155,58 y 1238,45 cm^{-1} . Para lo cual concluyeron que el CA preparado a partir de la BC desarrolló la presencia de varios grupos funcionales potenciales para la remoción del colorante amarillo anilina a partir de una solución acuosa.

Tabla 13. Grupos funcionales de las diferentes bandas para el CA derivado de la BC modificada con KOH

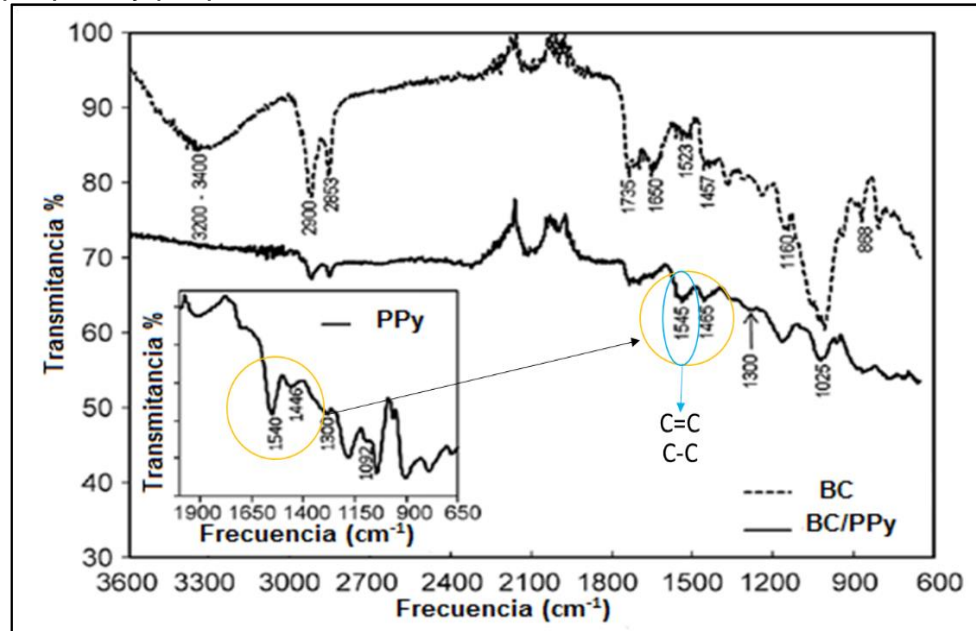
Frecuencia (cm^{-1})	Grupo funcional
3342,65	O-H
1372,39	O-H
2927,94	C-H
729,09	C-H
1620,23	C=C
1462,07	C=C
2100,50	C≡C
1155,58	C-O
1238,45	C-O

Fuente: elaboración propia con base en: PAGALAN, Efren; et al. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye. *Industrial Crops & Products*. 2020, Vol. 145, pp. 111953.

En lo que concierne a la investigación de Ovando¹⁴⁹, se muestran los espectros para la BC, el polipirrol y el compuesto de BC con polipirrol en la Figura 28. Reflejando la presencia de señales características de la celulosa para la BC y el polipirrol, al igual que una similitud de los espectros entre la BC y el compuesto, con la diferencia de una vibración mixta en 1545 cm^{-1} de los grupos C=C y entre anillos de C-C característicos del polipirrol. Del mismo modo los autores ilustran que las frecuencias a 3200 y 3400 cm^{-1} correspondientes al estiramiento de O-H y C-H de las señales de celulosa en la BC, no se encuentran presentes en el compuesto. Así como las señales de C-H a 2900 y 2853 cm^{-1} en las cadenas alifáticas que resultan ser más débiles, debido a la presencia del recubrimiento del polipirrol con las fibras de celulosa de la BC. Cabe exponer que los autores explican que las bandas a 1540 y 1446 cm^{-1} para el polipirrol se desplazan a 1545 y 1465 cm^{-1} en el compuesto debido a la unión química entre el grupo -NH en las unidades del anillo del polipirrol y los grupos -OH de la celulosa en la BC.

¹⁴⁹OVANDO. Op. Cit., p. 177 y 178.

Figura 28. Espectro de infrarrojo para la BC, compuesto de BC con polipirrol y polipirrol.



Fuente: OVANDO, Víctor; et al. A semi-conducting polypyrrole/coffee Grounds waste composite for rhodamine B dye adsorption. *Iranian Polymer Journal*. 2018, Vol. 27, pp. 178.

Las diferentes metodologías de caracterización de la BC tales como el PCC, la microscopía SEM, las isoterma BET y la espectroscopia FTIR, brindaron información fundamental para comprender el desempeño de este residuo agroindustrial en el proceso de biosorción de colorante sintéticos en el agua. Presentando cambios mediante el uso de agentes ácidos o básicos, bajo la activación con microondas, con fluidos magnéticos o compuestos poliméricos, que modifican las propiedades físico-químicas del material.

4. VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS

En este capítulo se expone tanto el pretratamiento convencional de la BC, como las diferentes modificaciones de la biomasa. Igualmente se presentan los factores que afectan la capacidad de biosorción o el porcentaje de remoción como son el pH, la concentración inicial del colorante, la dosis del biosorbente, el tiempo de contacto, el tamaño de partícula y la temperatura de operación.

4.1 PRETRATAMIENTO

Es uno de los factores que permite adecuar previamente la biomasa para el proceso de biosorción, eliminando contaminantes que pueden afectar la remoción de los colorantes. Por consiguiente diversos investigadores mencionan la necesidad de realizar un lavado a la BC con agua caliente o agua destilada para remover las impurezas o componentes solubles presentes en la biomasa¹⁵⁰ como los polifenoles, que le confieren el color característico al café¹⁵¹ (Figura 29). De esta manera se asegura que los colorantes no sean adsorbidos por otras sustancias del material y la cuantificación de concentración del analito no se vea afectado por el color liberado del biosorbente¹⁵².

Figura 29. Lavado de BC con agua caliente



Fuente: elaboración propia

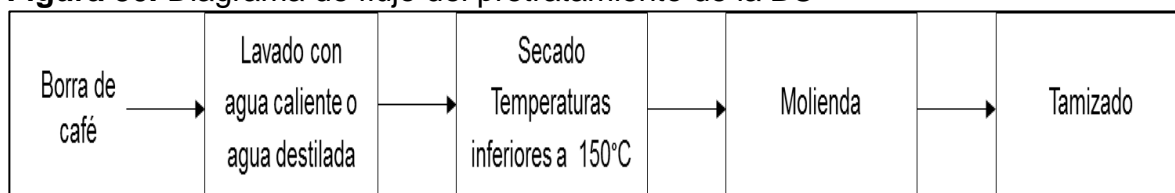
¹⁵⁰GARCÉS, Luz y COAVAS, Susana. Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) modificada con quitosano para la remoción de Cr (vi) en aguas residuales. Cartagena: Universidad de Cartagena, 2012. p. 48

¹⁵¹CHACUA, Daniela y RODRÍGUEZ, Mónica. Evaluación de los polifenoles extraídos a partir de residuos de *Coffea arábica*, para la producción de un coagulante natural. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América, 2018. p. 34.

¹⁵²ROMINA. Op. Cit., p. 51

Posteriormente, el material lavado se seca en un horno a temperaturas inferiores a 150°C para eliminar el contenido de humedad de la BC (75-85%)¹⁵³, lo cual acelera la proliferación de microorganismos si no es eliminada¹⁵⁴. Algunos investigadores después de la etapa de secado, homogenizan la muestra con el uso de un mortero y la tamizan para determinar el tamaño de partícula más adecuado en el proceso de biosorción. El pretratamiento se ilustra esquematizado en la Figura 30.

Figura 30. Diagrama de flujo del pretratamiento de la BC



Fuente: elaboración propia

En el caso de Kyzas¹⁵⁵, quien primero lavó el residuo con agua destilada para remover impurezas y el color característico de la BC. Seguidamente lo secó a 105°C durante 5h en un horno convencional para su posterior tamizado, obteniendo un biosorbente con tamaño de partícula entre 475 y 525 μm . Por su parte, Lafi¹⁵⁶ secaron el residuo de café a 60°C por 24h, alcanzando un tamaño de partícula menor a 250 μm después del proceso de molienda y tamizado. Otras investigaciones que realizaron este tipo de pretratamiento en la BC se exponen en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos bibliográficos sobre el pretratamiento realizado a la BC

Biosorbente	Lavado	Temperatura de secado (°C)	Tamaño de partícula (mm)	Referencia*
BC	Agua destilada	60	0,315	Ramos, Jaidith
BC	Agua destilada	105	0,475- 0,525	Kyzas, George

Fuente: elaboración propia

¹⁵³RIAÑO. Op. Cit

¹⁵⁴FERMÍN, Nayive et al. Evaluación de la calidad fisicoquímica y sensorial de tres marcas comerciales de café tostado y molido. *UDO Agrícola*. 2012, Vol. 2, Nro. 2, pp. 431 y 432

¹⁵⁵KYZAS. A Decolorization Technique with Spent "Greek Coffee" Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters Op. Cit., p. 2071.

¹⁵⁶LAFI. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution Op. Cit., p. 2198.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

Tabla 14. (Continuación)

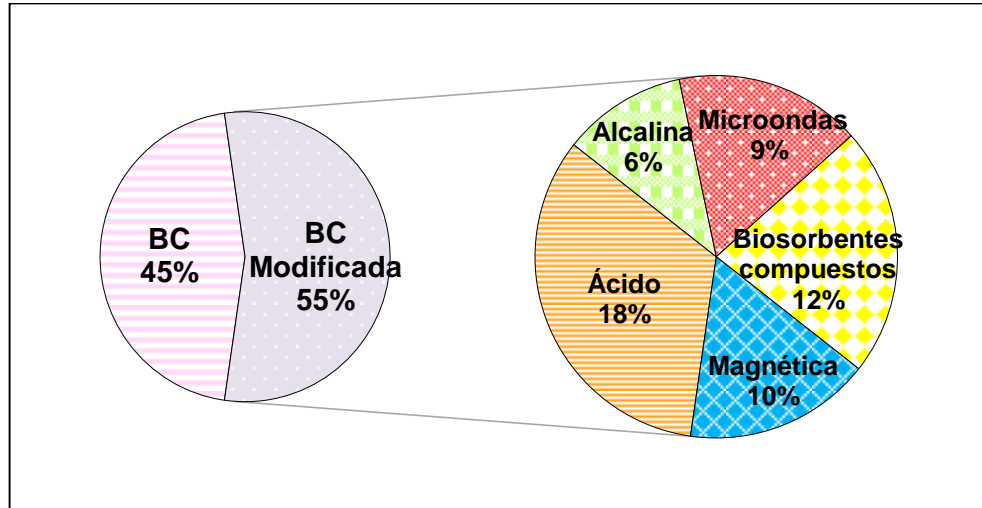
Biosorbente	Lavado	Temperatura de secado (°C)	Tamaño de partícula (mm)	Referencia*
BC modificada con H ₃ PO ₄	Agua destilada caliente	100	-	Castellar, Grey
BC	Agua destilada caliente	60	< 0,250	Lafi, Ridha
Compuesto de alginato de calcio con CA de BC	Agua destilada	105	0,425	Jung, Kyung-Won
BC modificada con H ₃ PO ₄	Agua destilada caliente	100	-	Castellar, Grey

Fuente: elaboración propia

4.2 MODIFICACIÓN DE LA BORRA DE CAFÉ

La necesidad de aumentar la capacidad de biosorción de los residuos lignocelulósicos ha conllevado a evaluar diferentes métodos de modificación que incrementen la porosidad del material, su área superficial y que eliminen compuestos que puedan interferir en el proceso de biosorción. Por consiguiente, diversos autores han analizado el efecto de modificar la BC mediante activación alcalina, ácida o por microondas, con fluidos magnéticos o a partir de la elaboración de biosorbentes compuestos para la remoción de colorantes sintéticos, como se muestra en la Figura 31

Figura 31. Datos bibliográficos sobre la BC y la BC modificada para la remoción de colorantes sintéticos en los últimos 18 años



Fuente: elaboración propia

4.2.1 Tratamiento alcalino. La activación química con el uso de KOH, NaOH, LiOH entre otros, permite el aumento de grupos carboxílicos y el ensanchamiento en el tamaño de los microporos de la biomasa, por la saponificación del grupo éster presente en los residuos lignocelulósicos¹⁵⁷. Tal es el caso de Pagalan¹⁵⁸, quienes estudiaron el uso de la BC activada con KOH en una proporción de 1:5 y carbonizada a 500°C para la remoción del colorante amarillo anilina. Ilustrando que la calidad del material obtenido fue atribuida por la modificación química de la estructura física, aumentando la formación de estructuras mesoporosas y microporosas que atraen el biosorbato en la superficie del biosorbente. Asimismo los investigadores observaron como el CA con KOH y derivado de la BC muestra resultados del 88,72% de remoción, en comparación con el porcentaje de remoción del CA sin ningún tipo de impregnación (41,36%). Lo que indica que la activación química aumenta hasta dos veces la remoción del colorante amarillo anilina.

Por su parte, Jung¹⁵⁹ analizaron el efecto de la BC carbonizada e impregnada bajo diferentes concentraciones de KOH (0, 5, 10 y 15 mol/L). La impregnación con el agente químico permitió el desarrollo de una mayor distribución y tamaño de poros, así como el incremento en el número de microporos y mesoporos a medida

¹⁵⁷ CALERO, M; et al. Efecto de diferentes tratamientos químicos en las características sorbentes de residuos. Derivados de la industria oliverera. *Afinidad LXVII*. 2010, pp. 273

¹⁵⁸ PAGALAN. Op. Cit., p. 111953

¹⁵⁹ JUNG. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues Op. Cit., p. 361 y 362.

que aumenta la relación de KOH (Tabla 15). Como resultado obtuvieron un material más heterogéneo, con nuevas cavidades y poros ensanchados en comparación a la BC carbonizada sin tratamiento alcalino. El biosorbente con impregnación de 15 mol/L tuvo mejor afinidad con el colorante naranja ácido 7, alcanzando una capacidad de biosorción de 1222,5 mg/g superior a otros biosorbentes informados.

Tabla 15. Efecto de la impregnación del CA de BC con KOH

Parámetro	Impregnación con KOH (mol/L)			
	0	5	10	15
Área de superficie específica (m ² /g)	185,6	1411,3	2018,1	2745,7
Volumen de poro total (cm ³ /g)	0,09	0,82	1,3	2,32

Fuente: elaboración propia con base en: JUNG, Kyung; et al. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues. *Journal of Cleaner Production*. 2017, Vol. 166, pp. 363.

La activación con KOH ha demostrado ser efectiva gracias al desarrollo de superficies más porosas como resultado de las múltiples etapas de interacción entre el KOH y el material carbonoso. Asimismo estas interacciones conllevaron a la implementación del CH₃CO₂K como agente activador¹⁶⁰. Por lo anterior, Lafi, Montasser y Hafiane¹⁶¹ activaron la BC con CH₃CO₂K para la biosorción del colorante RC. El CA obtenido, presentó una superficie microporosa por la interacción entre el ion de potasio, que se forma al disolver el CH₃CO₂K en agua, y el carbono del material¹⁶²; facilitando la biosorción de las moléculas del colorante en la superficie del biosorbente. Igualmente, el CA mostro un aumento en el número de sitios ácidos por la incorporación de grupos oxigenados durante la activación de la BC. La capacidad de biosorción fue de 90,90 mg/g, demostrando que la activación con CH₃CO₂K mejora la estructura del biosorbente y la remoción de contaminantes.

4.2.2 Tratamiento ácido. La modificación de la BC a partir de tratamientos ácidos, en especial con H₃PO₄, producen la despolimerización parcial de la hemicelulosa y la lignina; lo que genera un hinchamiento de las partículas de la

¹⁶⁰ AUTA, M y HAMEED, B.H. Optimized waste tea activated carbon for adsorption of Methylene Blue and Acid Blue 29 dyes using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*. 2011, Vol. 175, pp. 233

¹⁶¹ LAFI. Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration Op. Cit., p. 165 y 169

¹⁶² SHAWAL, Nasir; et al. Characteristics of Potassium Acetate - Activated Coconut Shell Carbon. *Advanced Materials Research*. 2014, Vol. 1043, pp. 194 y 197

biomasa y un aumento en el área superficial del material¹⁶³. Este es el caso de Torres y Vanegas¹⁶⁴ quienes activaron la BC con H₃PO₄, uno de los agentes activantes más usados hoy en día, que permitió la protonación de grupos funcionales carboxilo e hidroxilo de la superficie del material, aumentando la atracción y la penetración con los iones OH⁻ del colorante aniónico azul brillante FCF. Presentando un porcentaje de remoción del 98,6%, al contar con un incremento en el área de superficie y a su vez con una mayor distribución de los poros del biosorbente. A pesar de lo mencionado, los autores Castellar¹⁶⁵ mencionan la necesidad de carbonizar la BC activada con H₃PO₄ con el fin de obtener unidades más pequeñas ricas en carbono, que aumenten las propiedades de la textura del biosorbente, al observar que la impregnación a partir de éste ácido no es suficiente para la despolimerización de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina.

Para ello Reffas¹⁶⁶ modificaron el CA derivado de la BC con diferentes cantidades de ácido fosfórico: 30, 60, 120 y 180 %p/p, encontrando una disminución del volumen microporoso y a su vez un incremento en el volumen mesoporoso con impregnaciones superiores al 120% y con una mayor predominancia de microporos en proporciones menores al 120%. Asimismo muestran que las pérdidas de peso durante la carbonización del material a 450°C se encuentran entre el 62-68% y aumentan ligeramente con la impregnación con H₃PO₄. Sin embargo los rendimientos de producción son mayores (38-32%) en comparación a una simple carbonización del material (9,5%), lo que indica la capacidad del ácido para retener el material carbonoso. Cabe mencionar que la relación de impregnación permitirá una mayor capacidad de biosorción de los colorantes AM y Nylosan rojo pasando de 96,1 a 181 mg/g y de 23 a 367 mg/g respectivamente.

Chiang, Chen y Lin¹⁶⁷ estudiaron la carbonización de la BC en los rangos de 550 a 950°C, realizando previamente la desmineralización de la BC mediante la impregnación ácida con HCl 1,0 M, al ser un factor a considerar cuando se obtiene un carbón activado. Esto se debe a que los componentes de la materia mineral

¹⁶³CALERO. Op. Cit., p. 273

¹⁶⁴TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 49,73 y 92.

¹⁶⁵COLPAS, Fredy; TARÓN, Arnulfo y FONG, Waldyr. Análisis del desarrollo textural de carbones activados preparados a partir de zuro de maíz. *Temas Agrarios*. 2015, Vol. 20, Nro. 1, pp. 108.

¹⁶⁶REFFAS. Op. Cit., p.782, 783 y 786

¹⁶⁷CHIANG. Op. Cit., p. 103929

(óxidos metálicos o no metálicos) reducen el proceso de biosorción de la biomasa al modificar el desarrollo y la formación de la porosidad del material, por ende el contenido de estos materiales debe ser el menor posible¹⁶⁸. Consecuentemente los autores disminuyeron el contenido de cenizas o minerales del 5,22 al 0,11% después del tratamiento ácido leve, mejorando así la textura del material. Adicionalmente los investigadores observaron un cambio significativo de microporos a mesoporos en la estructura del material con temperaturas mayores a 900°C impregnada con HCl, donde la BC carbonizada a 950°C aumentó las capacidades de biosorción de 462 y 378 mg/g para los colorantes AM y NM.

4.2.3 Activación con microondas. El tratamiento con microondas es una de las técnicas ecológicas que suministran calentamiento a la biomasa para ser carbonizada, aumentando los poros del material y a su vez reduciendo el consumo de energía comparado con una activación convencional por calor¹⁶⁹. Así pues Pavlovic¹⁷⁰, mostraron que la BC activada por microondas resulta ser un tratamiento ecológico que reduce la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera durante su activación, presentando porcentajes de remoción del colorante CV mayores al 95% con el material obtenido. Igualmente Hirata¹⁷¹ investigaron el efecto de la BC carbonizada con microondas en periodos de 7, 9 y 12 min para la remoción de los colorantes AM, naranja 2 y violeta genciana. Presentando una disminución en el rendimiento de los materiales tratados con microondas por la creciente carbonización del residuo de café, convirtiendo una parte del carbón en CO₂. A pesar de lo mencionado, los autores exponen una reducción de la contaminación por la liberación del CO₂ durante el proceso a diferencia de la carbonización en mufla, pasando de 3460000 a 112000 toneladas de CO₂ con el supuesto de un consumo anual de café de 6432000 en el año 2000, además de presentar una disminución de 3750 a 75 W correspondiente a la cantidad de electricidad, utilizada para carbonizar la BC con mufla y con microondas respectivamente. Cabe resaltar que el método con microondas aumentó la porosidad del material, obteniendo una mayor remoción de los colorantes básicos AM y naranja 2 por la polaridad de la superficie.

¹⁶⁸ NAVARRETE, Luisa et al. Carbón activado: Efecto del lavado con ácido sulfúrico del precursor lignocelulósico, cuesco de palma africana, sobre los procesos de carbonización y activación. *Revista Colombiana de química*. 2005, Vol. 34, Nro, 1, pp. 68

¹⁶⁹ VINU, R y NAIR, Vaishakh. Peroxide-assisted microwave activation of pyrolysis char for adsorption of dyes from wastewater. *Bioresource Technology*. 2016, Vol. 216, pp. 512

¹⁷⁰ PAVLOVIC Op. Cit., p. 1967

¹⁷¹ HIRATA. Op. Cit., p. 19 y 20.

4.2.4 Modificación magnética. La BC modificada magnéticamente mediante el tratamiento con un ferrofluido que contiene nanopartículas de magnetita, ha mostrado buenos resultados en la biosorción de colorantes por la presencia de estructuras más porosas, con menor tamaño de partícula y mayores áreas de superficie¹⁷²; como resultado de la disposición de nanopartículas de magnetita en la superficie del material¹⁷³. Este tipo de modificación tiene la particularidad de recuperar fácilmente el biosorbente después de la biosorción, a partir de tecnologías de separación magnética¹⁷⁴.

Wen¹⁷⁵ evaluaron el rendimiento de los materiales carbonosos elaborados con BC y catalizados mediante diferentes cantidades de cloruro férrico: 5, 10, 15, 20 y 30%p/p, analizando la influencia de la temperatura de carbonización para la biosorción de los colorantes. Los resultados mostraron un aumento en el rendimiento del 47,6% para el CA (CG4) con 20% en peso y una temperatura de carbonización de 750°C. Adicionalmente, los autores realizaron una comparación entre un CA sin ninguna modificación magnética (CG0) y el CG4, donde el CG0 presentó una estructura de paredes gruesas y con macroporos. Mientras que el CG4, al estar catalizado con FeCl₃, mostró un tamaño uniforme, de paredes delgadas, con superficies rugosas y con una gran cantidad de mesoporos. Además las nanopartículas de magnetita (Fe₃O₄) generadas por el FeCl₃, se adhirieron a la superficie del biosorbente, exponiendo capacidades de biosorción para el colorante AM de 190,1 y 653,6 mg/g para la muestra CG0 y CG4 respectivamente. De esta manera, se evidencia que la modificación magnética de biosorbentes aumenta la capacidad de biosorción de los colorantes, además de tener la ventaja de recuperar el material sólido.

De igual manera, Safarik¹⁷⁶, modificaron la BC a partir de la precipitación de nanopartículas de óxido de hierro en la superficie de la BC como resultado del contacto con un fluido magnético. El biosorbente modificado mostro poros de hasta 0,3 mm de tamaño y una mayor afinidad en la biosorción del colorante naranja de acridina (73,4 mg/g), en comparación de los otros seis colorantes

¹⁷²SIVASHANKAR, R; et al. Magnetic composite an environmental super adsorbent for dye sequestration - A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2014, Vol. 1-2, pp. 39.

¹⁷³ZUORRO, Antonio; LAVECCHIA, Roberto y NATALI, Stefano. Magnetically Modified Agro-Industrial Wastes as Efficient and Easily Recoverable Adsorbents for Water Treatment. *Chemical Engineering Transactions*. 2014, Vol. 38, pp. 352

¹⁷⁴KEBEDE, TIGIST. Spent coffee grounds modified Fe -Al- Zr Nano- Composites for the removal of acid brown 75 dye from tannery waste. Addis Ababa, Ethiopia: Addis Ababa University. 2018, p. 20

¹⁷⁵WEN. Op. Cit., p. 94 y 95.

¹⁷⁶SAFARIK. Op. Cit., p. 346 y 347.

evaluados. Por ende, se demuestra que la BC modificada magnéticamente resulta ser un biosorbente económico y de fácil regeneración, al poder recuperar el material mediante imanes.

4.2.5 Biosorbentes compuestos. El uso de compuestos poliméricos como el polipirrol ha atraído la atención como biosorbente no tóxico, de fácil preparación, con propiedades inherentes que permiten el recubrimiento con sustratos para eliminar contaminantes disueltos en el agua¹⁷⁷. Un ejemplo es la investigación de Ovando¹⁷⁸, quienes prepararon un compuesto de residuos de café recubiertos con polipirrol utilizando persulfato de potasio como oxidante para la biosorción del colorante RB. El compuesto de polipirrol/BC produjo nanopartículas de tamaños entre 50 y 150 nm aglomeradas como partículas esféricas en las fibras celulósicas de la BC, sin embargo el área de superficie del compuesto disminuyó 2,2 veces en comparación con la BC sin recubrimiento por la disposición de las nanopartículas del polipirrol en los poros de la BC. A pesar de lo mencionado los autores obtuvieron una máxima capacidad de biosorción de 50,59 mg/g, mayor a la reportada por otras investigaciones que usan el mismo colorante.

Del mismo modo se ha informado el uso de quitosano como biopolímero adecuado para la remoción de contaminantes. Tal es el caso de Nitayaphat¹⁷⁹ quien estudió el potencial de combinar quitosano y BC para la biosorción del colorante Rojo reactivo 152, a partir de la preparación de perlas compuestas de quitosano/BC con relaciones másicas de 100/0, 90/10, 70/30, 60/40 y 50/50 respectivamente. Las perlas compuestas de relación 60/40 mostraron mayor porosidad (95,34%) en comparación con las perlas de quitosano (86,44%); por lo anterior se esperaba obtener una mayor remoción con las perlas compuestas que contenían más residuo de café. Sin embargo, al aumentar la concentración de BC en las perlas, se produce la formación de agregados de café que limitan la biosorción del colorante en los sitios activos, por lo cual el rendimiento de las perlas dependerá de la dispersión homogénea de la BC en el quitosano. Por otra parte, las perlas compuestas presentaron una mayor capacidad de biosorción (4,27 mg/g) a diferencia de las perlas de quitosano (3,47 mg/g), con lo cual se concluyó que el uso de biosorbente compuestos tiene ventajas en el tratamiento de aguas residuales.

¹⁷⁷BALLAV, Niladri; MAITY, Arjun y MISHRA, Shivani. High efficient removal of chromium (VI) using glycine doped polypyrrole adsorbent from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*. 2012, Vol. 198, pp. 537.

¹⁷⁸OVANDO. Op. Cit., p. 179.

¹⁷⁹NITAYAPHAT. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye Op. Cit., p. 6277, 6279 y 6281.

De manera similar, Jung¹⁸⁰ investigó un método económico para la eliminación de los colorantes AM y naranja ácido 7, mediante el uso del CA derivado de la BC con alginato de calcio. De acuerdo con la caracterización, los autores identificaron la formación de perlas oscuras con un diámetro promedio de 2,03 mm, generadas por la inmovilización de la BC carbonizada en la matriz del alginato de calcio, lo que facilita la formación de hidrogeles. Asimismo evidenciaron una superficie rugosa y heterogénea en la superficie de las perlas con la presencia de microporos que favorecen el proceso de biosorción de colorantes, presentando capacidades de biosorción de 986,81 y 665,85 mg/g para el AM y el naranja ácido 7 respectivamente. Asegurando que las perlas compuestas de alginato de calcio con BC carbonizada, resultan ser una clara alternativa como biosorbente económico y potencial para la remoción de colorantes.

Wong¹⁸¹, estudiaron el uso del polímero de polietilenimina para la modificación de la BC, como material que permite la unión de biosorbatos aniónicos por la presencia de grupos amina cargados positivamente. Encontrando una mayor cantidad de cargas positivas en el biosorbente generados por el incremento de grupos funcionales básicos en el compuesto. Igualmente observaron aumentos ligeros en el área de superficie del biosorbente relacionado al lavado y secado repetitivos de la muestra que elimina impurezas de la superficie. No obstante las propiedades en la textura del compuesto en comparación a los carbonos activados sintetizados a partir de residuos biológicos resultan ser inferiores, determinando que el papel de estas propiedades es insignificante durante el proceso de biosorción de los colorantes. Finalmente los autores concluyeron que la modificación de la superficie es un método potencial que mejora el rendimiento de biosorción, ilustrando capacidades máximas de 77,52 y de 34,36 mg/g para los colorantes negro reactivo 5 y RC respectivamente.

4.3 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE BIOSORCIÓN

La capacidad de biosorción y el porcentaje de remoción dependen de las propiedades fisicoquímicas del biosorbente, las características químicas del biosorbato y las condiciones experimentales, siendo este último factor el más importante durante el proceso de biosorción de contaminantes¹⁸². A continuación

¹⁸⁰JUNG. Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue Op. Cit., p. 188 y 192.

¹⁸¹WONG. Op. Cit., p. 2, 3, 4 y 10

¹⁸²ANASTOPOULUS, Ioannis; et al. A review for coffee adsorbents. *Journal of Molecular Liquids*. 2017, Vol. 229, pp. 557.

se presentan los estudios de las diferentes variables críticas que influyen en la eliminación de distintos colorantes a partir de la BC y la BC modificada.

4.3.1 pH. Es uno de los factores de mayor influencia en el proceso de biosorción que determina no solo la carga superficial del biosorbente sino también la química y el grado de ionización de la solución¹⁸³. Estudios realizados por diferentes autores señalan que el proceso de biosorción depende significativamente del pH de la solución al aumentar o disminuir sus porcentajes de remoción según sea el caso de estudio. En general cuando la carga superficial del biosorbente es negativa se favorecerá la remoción de colorantes catiónicos, caso contrario a los colorantes aniónicos que tendrán una mejor retención cuando el biosorbente presente cargas positivas¹⁸⁴.

Por tal razón, gran parte de las investigaciones que emplean BC y BC modificada para la remoción de colorantes disueltos en el agua, estudiaron el efecto del pH como se presenta en la Tabla 16. Donde se muestra el porcentaje de remoción y las capacidades máximas de biosorción ($q_{m\acute{a}x}$) con el valor de pH más adecuado.

Tabla 16. Datos bibliográficos sobre porcentajes de remoción y capacidades máximas de biosorción

Colorante	Tipo de colorante	pH solución	PCC	$q_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	Referencia*
AM	Catiónico	10	3,47	34,48	Ramos, Jaidith
CV	Catiónico	6	5,6	36,82	Pavlovic, Marija
Azul de toluidina	Catiónico	>5	5,5	142,5	Lafi, Fradj y Hameed
NM	Aniónico	3	8	658	Rattanapan, Srikram y Kongsune
Rojo 44	Aniónico	1	6	27,778	Roh, Jinkyu
RC	Aniónico	3	8,57	34,36	Wong, Syieluing
Remazol amarillo y rojo	Reactivo	2	3,3-3,5	241	Kyzas, George

Fuente: elaboración propia

¹⁸³SRIVASTAVA, et al. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006, Vol. 272, pp. 94.

¹⁸⁴RAMOS. Op. Cit., p. 66.

*La referencia completa se encuentra en la bibliografía

De acuerdo a los datos de la Tabla 16, se observa que a valores de pH mayores al PCC, la remoción de colorantes catiónicos aumenta al favorecer tanto la desprotonación de los grupos funcionales del biosorbente, como las interacciones electrostáticas entre la carga negativa de la superficie del biosorbente y los cationes del colorante¹⁸⁵. Sin embargo, los colorantes catiónicos presentes en soluciones con pH ácidos pueden llegar a generar una baja retención del colorante en el biosorbente, por la presencia de hidrogeniones. Es decir, iones H⁺ de la solución que compiten con los cationes de los colorantes por los sitios activos¹⁸⁶. Por el contrario la biosorción de los colorantes aniónicos se ve favorecida a pH menores al PCC, al incrementar la atracción electrostática entre el colorante aniónico y el biosorbente, relacionado principalmente por el aumento de la carga positiva de la superficie de la biomasa¹⁸⁷. Por lo anterior, Ramos¹⁸⁸ menciona que la remoción de colorantes catiónicos como el AM y CV se favorece a pH superiores a 4,5, mientras que a pH entre 1,4 y 4 se remueven con mayor eficiencia los colorantes aniónicos como el NM y RC. Adicionalmente se recomienda usar un pH entre 2 y 7, dado a que el uso de pH extremos en las soluciones como los que se emplean durante el proceso de desorción, pueden llegar a ocasionar daños en la estructura del material biosorbente, disminuyendo significativamente el peso del material, además de la capacidad de biosorción¹⁸⁹.

En la investigación realizada por Franca, Oliveira y Ferreira¹⁹⁰ se evaluó el efecto del pH entre 3 y 11 para la biosorción de AM, alcanzando porcentajes de remoción del 81% a un pH igual a 3 y del 95% a un pH en el rango de 5-11, confirmando que la remoción de los colorantes catiónicos se favorece a pH básicos. Por otra parte Rattanapan, Srikran y Kongsune¹⁹¹ analizaron la influencia del pH en la remoción de NM a partir de la BC activada con HNO₃ en el rango de 3 a 12. Los autores observaron una mejor capacidad de biosorción a pH ácido y por debajo del PCC, como se observa en la Figura 32. Esto se debe a que la superficie del biosorbente al estar cargada positivamente (PCC igual a 8), permite la interacción

¹⁸⁵CHAPARRO, Cinthia; CABANAZO, Rafael; y MEJÍA, Enrique. Estudio de la adsorción de azul de metileno sobre óxido de grafeno. *Revista Colombiana de Materiales*. 2014, Nro. 5, pp. 138.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

¹⁸⁶RAMOS. Op. Cit., p. 91.

¹⁸⁷ENSUNCHO, Adolfo; ROBLES, Juana y CARRIAZO, José. Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Sociedad Química de Perú*. 2015, Vol. 81, Nro. 2, pp. 142. ISSN 1810-634X

¹⁸⁸RAMOS. Op. Cit., p. 39

¹⁸⁹SCHIEWER, Silke y VOLESKY, Bohumil. Modeling of the proton-metal ion exchange in biosorption. *Environmental Science & Technology*. 1995, Vol. 29, Nro. 12, pp. 3049.

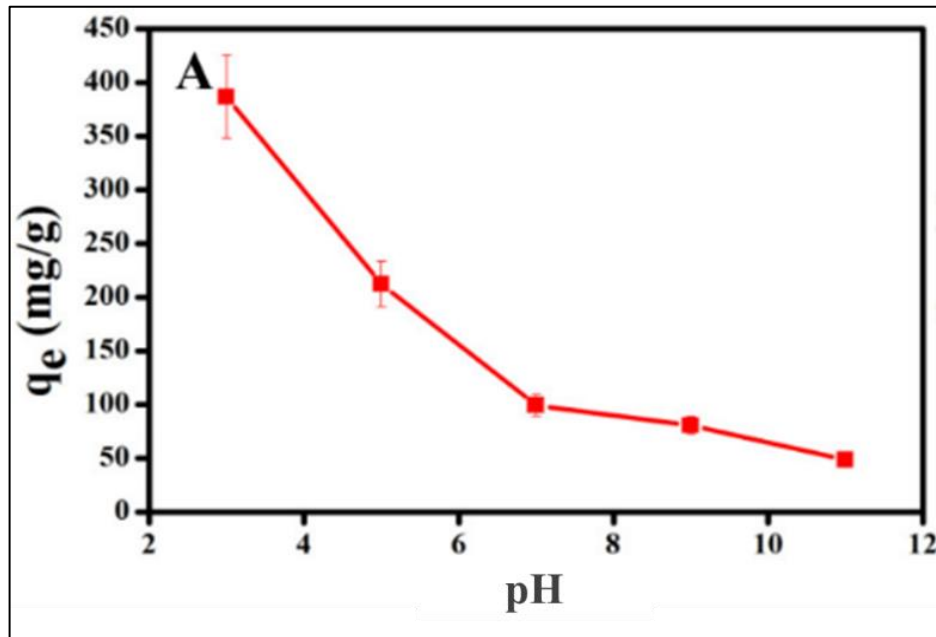
*La referencia completa se encuentra en la bibliografía

¹⁹⁰FRANCA. Op. Cit., p. 269.

¹⁹¹RATTANAPAN. Op. Cit., p. 951.

entre los aniones del colorante y los iones H^+ de la superficie. Además la capacidad de biosorción disminuye a pH básicos por la interacción electrostática débil entre el NM y la BC.

Figura 32. Efecto del pH de la solución en la remoción de NM

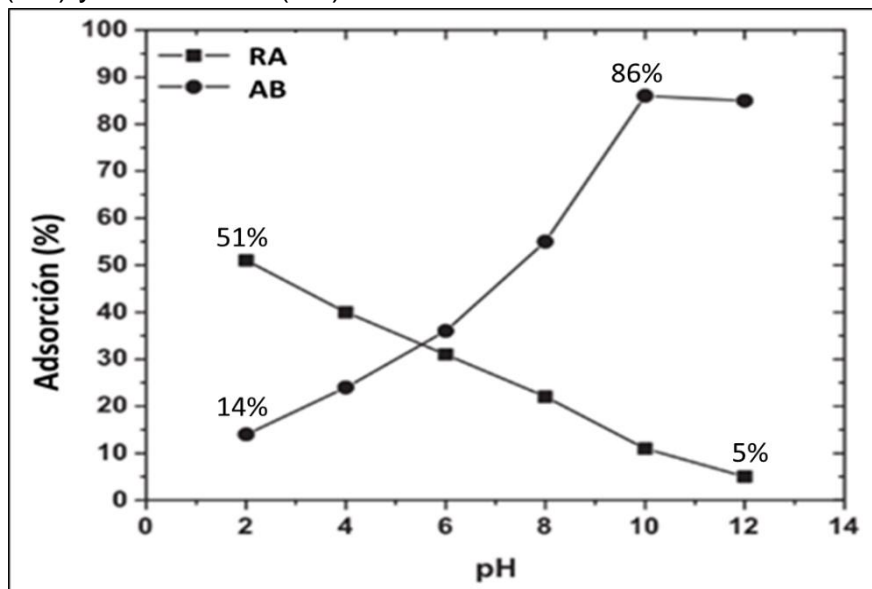


Fuente: RATTANAPAN, Supaporn; SRIKRAM, Jiraporn y KOGSUNE, Panita. Adsorptive of methylene orange on coffee grounds activated carbon. *Energy Procedia*. 2017, Vol. 138. pp. 952.

En el trabajo de Kyzas¹⁹² se logra evidenciar el contraste del efecto del pH en la remoción de los colorantes reactivo (remazol azul) y básico (azul básico), empleando BC como biosorbente. En el caso del azul básico, el porcentaje de remoción aumenta del 14% al 86% con un pH de 2 y 10 respectivamente, mientras que en el caso del remazol azul el porcentaje de remoción disminuye al incrementar el pH de 2 a 10, como se observa en la Figura 33. Esto se da específicamente por el uso de un pH por encima o por debajo del PCC (3,5), lo que conlleva a que a valores de pH menores al PCC, la superficie de la BC se protona y aumente la interacción entre los grupos sulfonatos negativos del colorante con la superficie positiva del biosorbente. Caso contrario a la biosorción del azul básico, donde a valores de pH por encima del PCC se produce la desprotonación de la BC, generando una carga superficial negativa que mejora la remoción del colorante básico.

¹⁹²KYZAS. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. Op. Cit., p.153

Figura 33. Efecto del pH en la biosorción de Remazol Azul (RA) y Azul Básico (AB)



Fuente: KYZAS, George Z; et al. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chemical engineering journal*. 2012, Vol. 189-190, pp. 153

En cuanto al estudio sobre la BC modificada con polipirrol, los autores obtuvieron un mayor porcentaje de remoción del 99% para el colorante negro reactivo 5 en comparación al RC (94%), debido a que el negro reactivo 5 contiene cuatro grupos sulfonatos cargados negativamente que interactúan con la superficie positiva del biosorbente mediante atracción electrostática y enlaces hidrogeno. Caso contrario al colorante RC, que solo contiene dos grupos sulfonatos. Por tal razón, las moléculas del colorante negro reactivo 5 presentan una interacción más fuerte con el biosorbente¹⁹³.

4.3.2 Concentración del colorante. Es uno de los parámetros que afecta tanto la tasa de saturación como el tiempo de penetración entre el adsorbato y la superficie del biosorbente¹⁹⁴. Según Lafi, Montasser y Hafiane la concentración del adsorbato “proporciona la fuerza impulsora necesaria para superar la resistencia a la transferencia de masa de las moléculas del colorante entre la fase acuosa y la fase sólida”¹⁹⁵. Por ende una mayor concentración inicial del colorante mejorará el

¹⁹³ WONG. Op. Cit., p. 2

¹⁹⁴ ENSUNCHO. Op. Cit., p. 142.

¹⁹⁵ LAFI. Adsorption of Congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration Op. Cit., p. 167.

proceso de biosorción al incrementar el número de colisiones entre los iones del colorante y la superficie del biosorbente¹⁹⁶. Sin embargo existe una concentración a partir de la cual la capacidad de biosorción no aumenta cuando el proceso de biosorción llega a la saturación, presentando fuerzas repulsivas entre las moléculas del colorante y el biosorbente¹⁹⁷. A continuación se muestran las distintas investigaciones que estudian el efecto de la concentración inicial de los colorantes durante el proceso de biosorción (Tabla 17).

Tabla 17. Datos bibliográficos sobre la concentración inicial de colorante de distintas investigaciones

Biosorbente	Colorante	Concentración inicial (mg/L)	q _{máx} (mg/g)	Referencia*
CA de BC con KOH	Amarillo anilina	35	2,58	Pagalan, Efren
CA de BC con HNO ₃	NM	300	658	Rattanapan, Srikram y Kongsune
BC	AM	50	4,68	Nitayaphat, Walaikorn
BC activada con microondas	CV	250	38,82	Pavlovic, Marija
BC modificada magnéticamente	Naranja de acridina	200	73,4	Safarik, Ivo
BC compuesta con polipirrol	RB	200	50,59	Ovando, Víctor

Fuente: elaboración propia

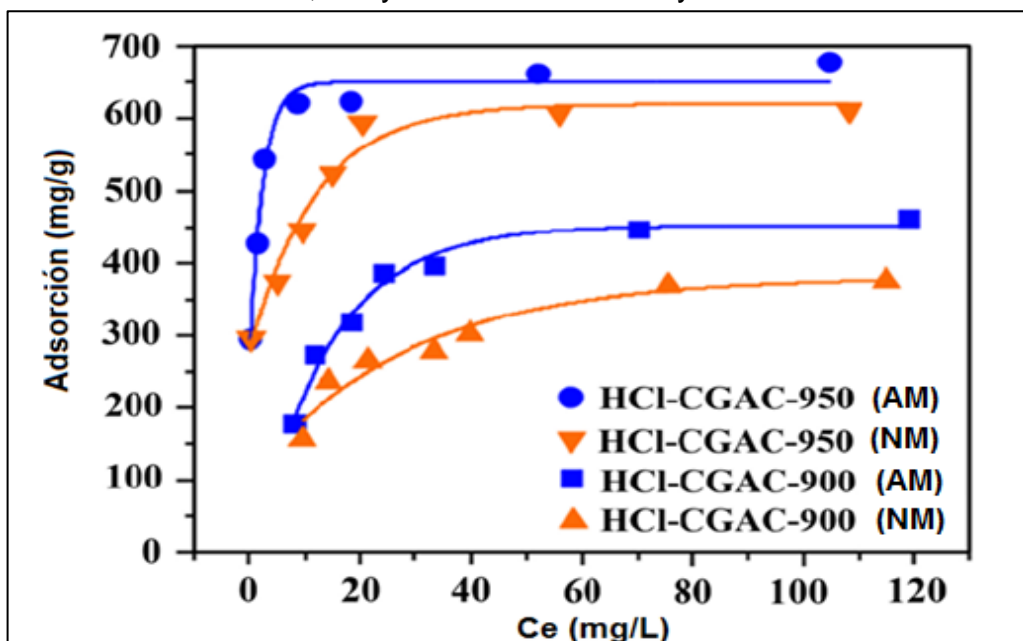
¹⁹⁶SLIMANI, Rachid; et al. Calcined eggshells as a new biosorbent to remove basic dye from aqueous solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2013, Vol. 45, Nro. 4, pp. 1583.

¹⁹⁷HINCAPIÉ. Op. Cit., p. 110.

*La referencia completa se encuentra en la bibliografía

Chiang, Chen y Lin¹⁹⁸ evidenciaron una mayor capacidad de biosorción de 462 y 378 mg/g a 678 y 612 mg/g para los colorantes AM y NM respectivamente, por el incremento en la temperatura de carbonización de la BC modificada con HCl 1,0M que presenta un mayor contenido de estructuras mesoporosas en la superficie del material (Figura 34). Una vez concluyeron que la mejor capacidad de biosorción se da con la muestra de BC modificada con HCl 1,0 M y carbonizada a 950°C, estudiaron la influencia de diferentes concentraciones de los colorantes AM y NM entre 20 y 60 mg/L, mostrando un aumento en la capacidad de biosorción por el incremento del número de colisiones entre los colorantes y el biosorbente como se muestra en la Figura 35.

Figura 34. Biosorción de los colorantes AM y NM a partir de la BC modificada con HCl 1,0 M y carbonizada a 900 y 950°C

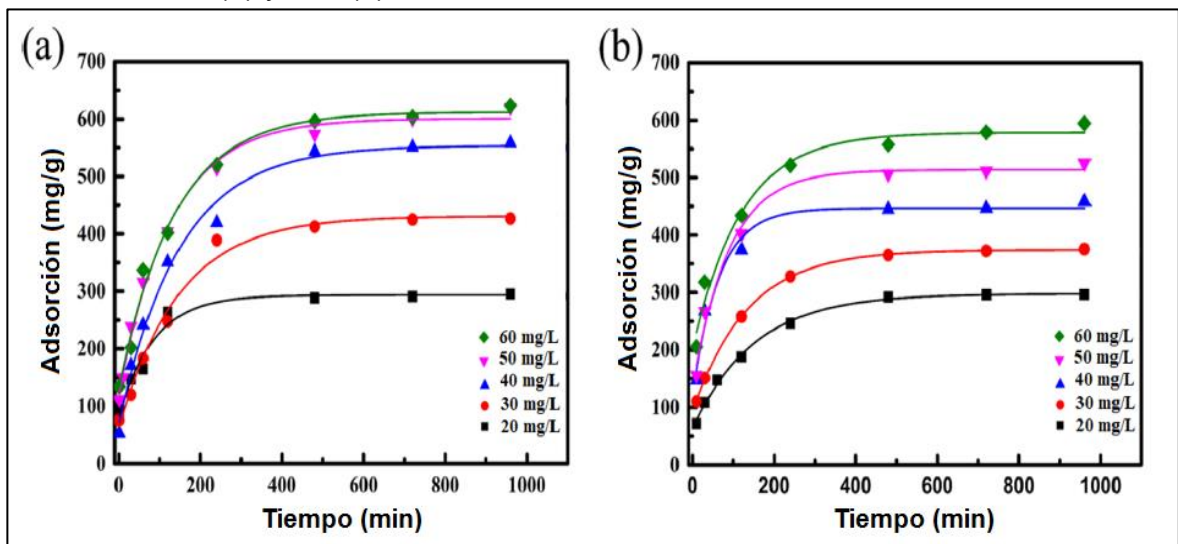


Fuente: CHIANG, Chih; CHEN, Jian y LIN, Jarrn. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp.103929

¹⁹⁸CHIANG. Op. Cit., p. 103929.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

Figura 35. Efecto de la concentración inicial en la capacidad de biosorción de los colorantes AM (a) y NM (b)



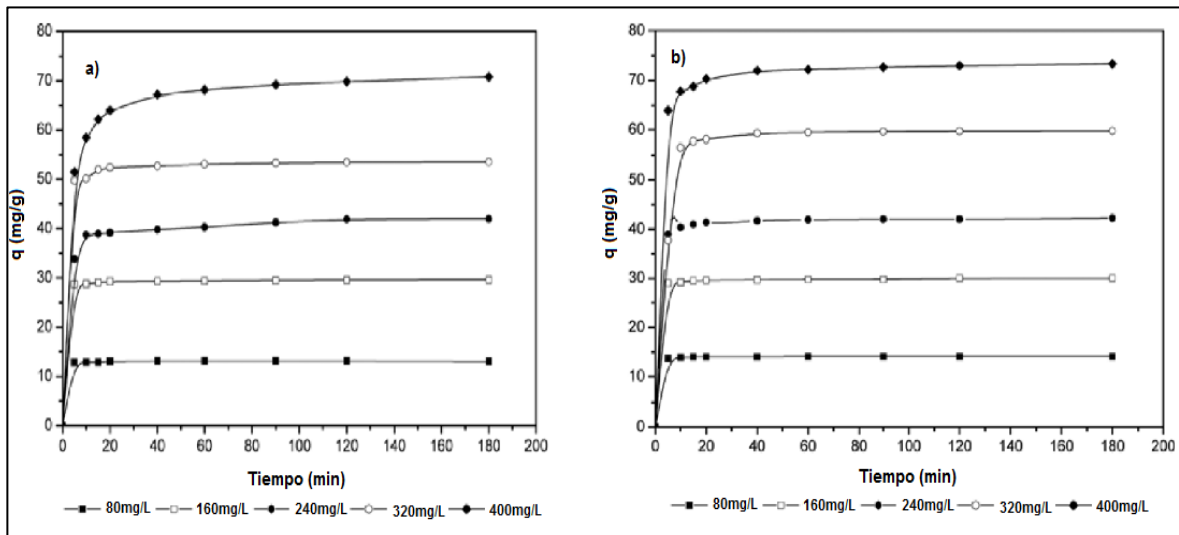
Fuente: CHIANG, Chih; CHEN, Jian y LIN, Jarrn-Horng. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp.103929

Así mismo Lafi, Montasser y Hafiane¹⁹⁹ ilustraron un aumento en la cantidad adsorbida del colorante RC al pasar de una concentración inicial del tinte de 20 a 120 mg/L, proporcionando la fuerza impulsora necesaria para transferir las moléculas del colorante a la BC modificada con acetato de potasio y mejorando tanto su interacción como su capacidad de biosorción. Cabe mencionar que la concentración inicial de los colorantes CV y azul de toluidina en la investigación de Lafi²⁰⁰, presentó el mismo comportamiento anteriormente mencionado. Al incrementar la capacidad de biosorción de 14,0 a 73,3 mg/g para el colorante azul de toluidina y de 13 a 70,6 mg/g para el CV, con un incremento en la concentración inicial de 80 a 400 mg/L como se muestra en la Figura 36. Posteriormente no se observó ningún cambio representativo en la biosorción de los colorantes dado a que los sitios activos fueron disminuyendo hasta alcanzar el equilibrio.

¹⁹⁹LAFI. Adsorption of Congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration Op. Cit., p. 167

²⁰⁰LAFI. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution Op. Cit., p. 2202.

Figura 36. Efecto de la concentración inicial en la capacidad de biosorción de los colorantes CV (a) y azul de toluidina (b)

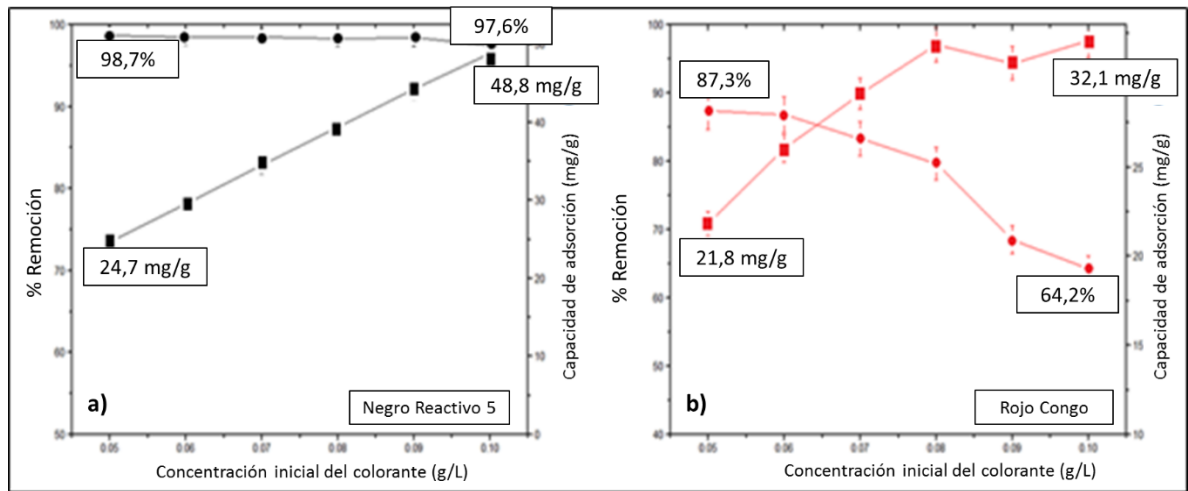


Fuente: LAFI, Ridha; et al. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution. *Korean Journal Chemical Engineer.* 2014, Vol. 31, Nro, 12, pp. 2202.

Con respecto a los autores Wong²⁰¹, estudiaron el efecto de la capacidad de biosorción y el porcentaje de remoción de la BC con polietilenimina al aumentar la concentración inicial de los colorantes negro reactivo 5 y RC. Observando altas remociones de los colorantes de 98,7% y 87,3% respectivamente a una concentración de 0,05 g/L, sin embargo evidenciaron una disminución en el porcentaje de remoción con una concentración de 0,10 g/L para los colorantes negro reactivo 5 (97,6%) y RC (64,2%). El anterior comportamiento se debe a la saturación de los sitios disponibles del biosorbente y la dispersión de una mayor cantidad de moléculas en la solución que no fueron adsorbidas, reduciendo el porcentaje de remoción. En cuanto a la capacidad de biosorción se presentó un incremento de 24,7 a 48,8 mg/g para el colorante negro reactivo 5 y de 21,8 a 32,1 mg/g con respecto al RC, considerando un aumento en el gradiente de concentración inicial de los colorantes que proporciona la fuerza impulsora para vencer la resistencia a la transferencia de masa del colorante entre la fase acuosa y la fase sólida (Figura 37).

²⁰¹WONG Op. Cit., p. 4

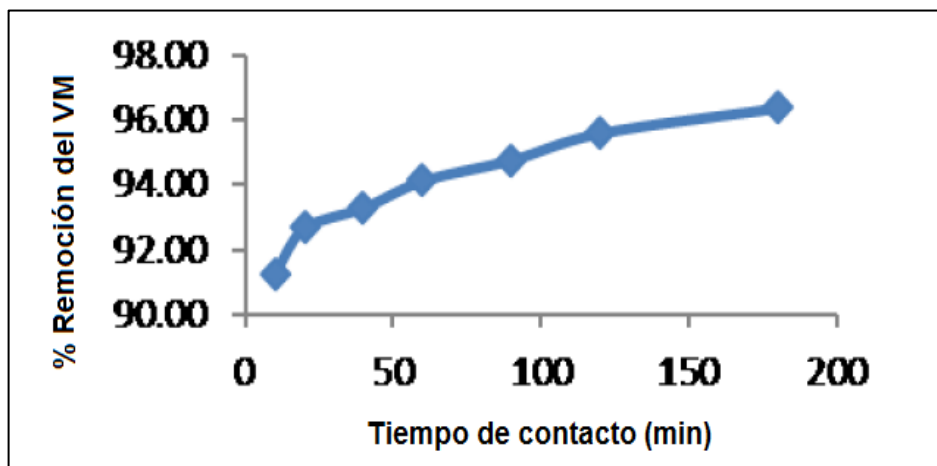
Figura 37. Efecto de la concentración inicial del colorante negro reactivo 5 (a) y RC (b) en la capacidad de biosorción (■) y el porcentaje de remoción (●)



Fuente: WONG, Syieluing; et al. Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific reports*. 2020, Vol. 10, Nro. 1, pp. 6

Igualmente Atirah²⁰², aseguraron que el porcentaje de remoción del colorante VM disminuyó del 99,63% al 98,6%, con una mayor concentración inicial del tinte de 50 a 250 mg/L, como se muestra en la Figura 38. Dado a que los sitios de biosorción en la superficie de la BC se encuentran limitados por la cantidad fija del biosorbente utilizado (0,1 mg).

Figura 38. Efecto de la concentración inicial para la remoción del colorante VM



Fuente: ATIRAH, Siti; et al. Malachite Green Adsorption by Spent Coffee Grounds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 318, pp.4.

²⁰²ATIRAH. Op. Cit., p. 4.

4.3.3 Dosis de biosorbente. Un incremento en la dosificación del biosorbente conlleva a un aumento en la remoción de contaminantes, al presentar una mayor disponibilidad de sitios activos en el mismo²⁰³. Es decir, una mayor disponibilidad de sitios intercambiables para la unión entre los iones del colorante y el biosorbente, al igual que una mayor área de superficie de la biomasa²⁰⁴. A continuación, en la Tabla 18, se presenta la recopilación de diferentes investigaciones que estudian el efecto en la cantidad del biosorbente para la remoción de colorantes sintéticos disueltos en el agua.

Tabla 18. Datos bibliográficos de la dosis de biosorbente usado en la remoción de colorantes sintéticos

Biosorbente	Colorante	Dosis de biosorbente (g/L)	q _{máx} (mg/g)	Referencia*
BC	Remazol, amarillo, rojo y azul	1	241	Kyzas, George
BC	Azul de toluidina	5	142,5	Lafi, Ridha
BC	Rojo neutro	0,4	138,6	Dai, Yingjie
BC activada con microondas	CV	15	38,82	Pavlovic, Marija
BC	Rojo ácido 44	1	27,8	Roh, Jinkyu
BC modificada con KOH	Amarillo anilina	0,6	2,58	Pagalan, Efren

Fuente: elaboración propia

Como se expone en la Tabla 18, distintas investigaciones han estudiado el efecto de la dosificación de la BC y la BC modificada para la remoción de diferentes colorantes. Tal es el caso de Nitayaphat²⁰⁵, quien evaluó diferentes cantidades del biosorbente (1-5 g) en la remoción del colorante rojo reactivo 152, (Figura 39). Obteniendo aumentos en los porcentajes de remoción, a medida en que se incrementa la dosis del compuesto de BC con quitosano, gracias a la presencia de

²⁰³FERNANDEZ, M.E, et al. Procesamiento de cáscaras generadas en la industrialización de naranjas para su empleo como biosorbente en la remoción de efluentes coloreados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2011, Vol. 15, pp. 10. ISSN 0329-5184.

²⁰⁴MOUSSA, Abbas; et al. Kinetic and equilibrium studies of coomassie blue G-250 adsorption on apricot stone activated carbon. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*. 2015, Vol. 5, Nro. 2, pp. 5.

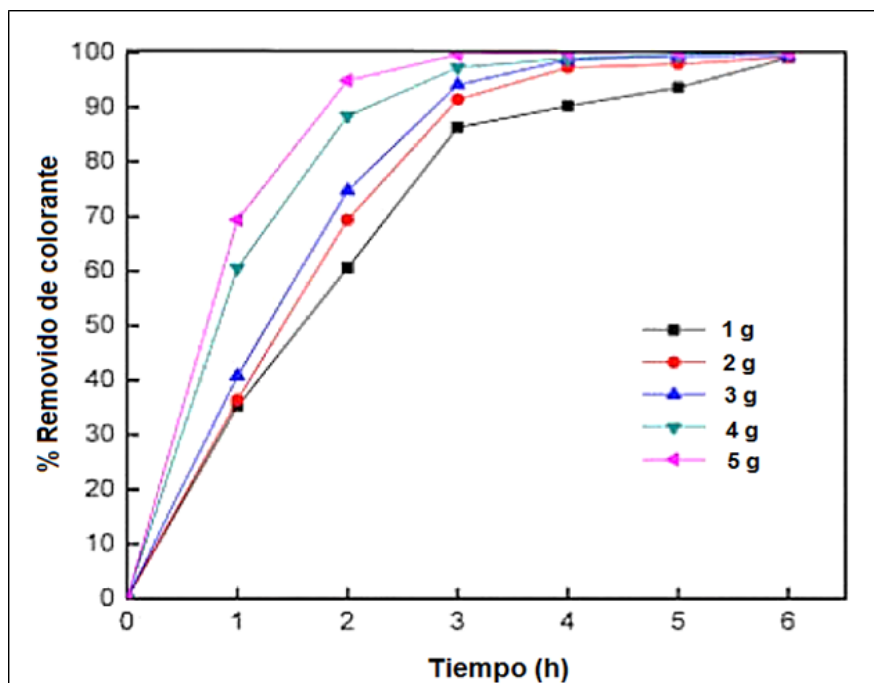
*La referencia completa se encuentra en la bibliografía

²⁰⁵NITAYAPHAT. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye. *Op. Cit.*, p. 6280.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

una mayor cantidad en el número de sitios activos disponibles del material. Adicionalmente evidenciaron que a mayores cantidades del biosorbente, el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio se reduce, pasando de 6 h con el uso de 1 g a 3 h al usar 5 g del biosorbente.

Figura 39. Efecto de la cantidad de biosorbente para la biosorción del colorante ácido

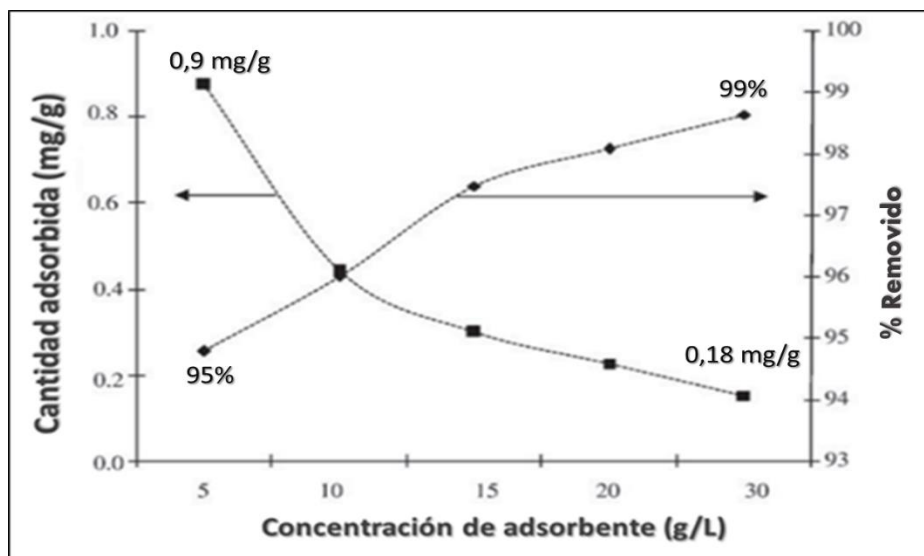


Fuente: NITAYAPHAT, Walaikorn. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye. *Materials Today: Proceedings*. 2017, Vol. 4, pp. 6280.

Para Dai²⁰⁶, la influencia en la dosis del biosorbente presentó un mayor porcentaje de remoción del 69,1 al 97,4% para el colorante AM. Sin embargo la capacidad de biosorción del colorante se redujo de 86,6 a 15,2 mg/g, por la superposición o agregación de los sitios activos, que ocasiona una disminución en el área de superficie total disponible de la biomasa para remover el colorante. Estudios similares concluyeron el mismo efecto al aumentar la dosis del biosorbente como informa Franca, Oliveira y Ferreira en la Figura 40.

²⁰⁶DAI, Yingjie; et al. Effect of contact time, solution pH, dosage of adsorbent, ionic strength and regeneration on adsorption behavior of methylene blue on spent coffee grounds. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016, Vol. 25, Nro. 9, pp. 3419.

Figura 40. Efecto de la dosis de adsorbente en la remoción de AM con BC



Fuente: FRANCA, Adriana; OLIVEIRA, Leandro y FERREIRA, Mauro. Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee Grounds. *Desalination*. 2009, Vol. 249, Nro. 1, pp. 270.

4.3.4 Tiempo de contacto. Es una de las variables que permite alcanzar la máxima biosorción de los colorantes en el biosorbente hasta un estado de equilibrio, iniciando por la migración de los iones del biosorbato desde la solución a la superficie del biosorbente, seguido de la difusión a través de la capa superficial de la biomasa y su fijación en el grupo activo, finalizando con la difusión intra-particular hacia el interior de la biomasa²⁰⁷.

En la Tabla 19 se ilustran los tiempos de contacto alcanzados para obtener las máximas capacidades de biosorción y los porcentajes de remoción de diferentes colorantes a partir de la BC y la BC modificada.

Tabla 19. Máxima capacidad de biosorción ($q_{m\acute{a}x}$) y porcentaje de remoción a diferentes tiempos de contacto

Biosorbente	Colorante	Tiempo (min)	$q_{m\acute{a}x}$ (mg/g)	Referencia*
BC activada con microondas	CV	15	36,82	Pavlovic, Marija

Fuente: elaboración propia

²⁰⁷MARTÍN, María. Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. España. Universidad de Granada. 2008, p. 66

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

Tabla 19. (Continuación)

Biosorbente	Colorante	Tiempo (min)	q _{máx} (mg/g)	Referencia*
CA de BC modificado con HNO ₃	NM	90	658	Rattanapan, Srikran y Kongsune
BC modificada con KOH	Amarillo anilina	130	2,58	Pagalan, Efren
CA de BC modificado con KOH	Naranja ácido 7	180	1222,5	Jung, Kyung-Won
BC	AM	95	78,90	Kopsidas, Odysseas
BC	Rojo neutro	120	136,98	Dai, Yingjie

Fuente: elaboración propia

Con respecto a los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones mencionadas, se presenta en su mayoría dos etapas durante el proceso de biosorción a lo largo del tiempo: una primera donde se da una biosorción rápida en los primeros minutos de contacto y una segunda etapa más lenta hasta alcanzar la saturación²⁰⁸. Benmaamar²⁰⁹ estudiaron el tiempo de contacto en periodos de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 180, 240 y 300 min para la remoción del colorante AM a partir de la BC. Evidenciando una rápida difusión y biosorción en la superficie de la biomasa en el rango de 0-30 min por la existencia de un mayor número de sitios de superficie disponibles, que poco a poco disminuyen hasta alcanzar el equilibrio en el rango de 60-300 min (Figura 41). Asimismo Atirah²¹⁰ evidenciaron que el porcentaje de remoción del colorante VM es proporcional al tiempo de contacto, pero será constante cuando se logre el equilibrio como se muestra en la Figura 42. Por otra parte, Torres y Vanegas²¹¹ observaron una remoción rápida del colorante azul brillante FCF con BC a los 60 min, y una máxima remoción (99%) a los 120 min. Esto se debe a que en la fase inicial de biosorción, hay una mayor cantidad de sitios disponibles y a medida que

²⁰⁸MARTÍN Op. Cit., p. 217.

²⁰⁹BENMAAMAR, Z et al. Removal of methylene blue by adsorption onto coffee residues: Kinetics and equilibrium study. *The International Journal of Multi-disciplinary Sciences*. 2016, Vol. 1, pp. 7

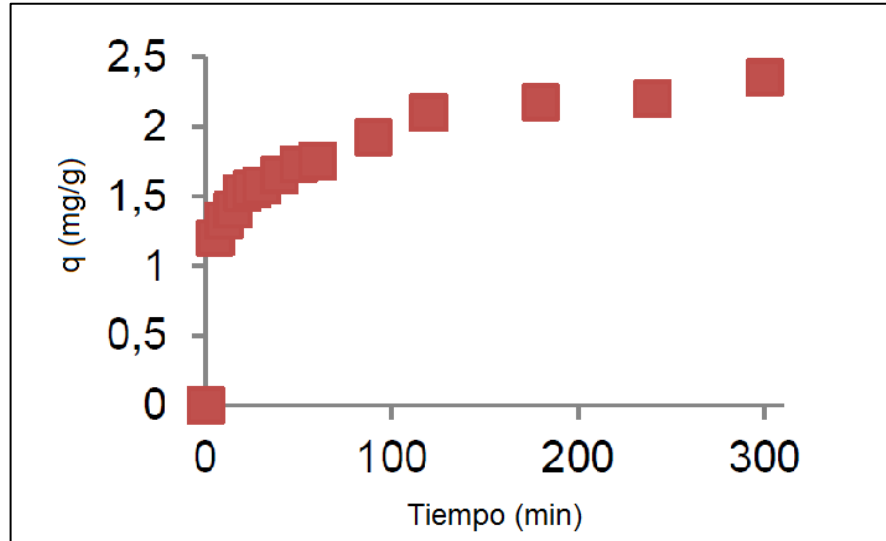
²¹⁰ATIRAH Op. Cit., p. 4.

²¹¹TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Op. Cit., p. 82.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

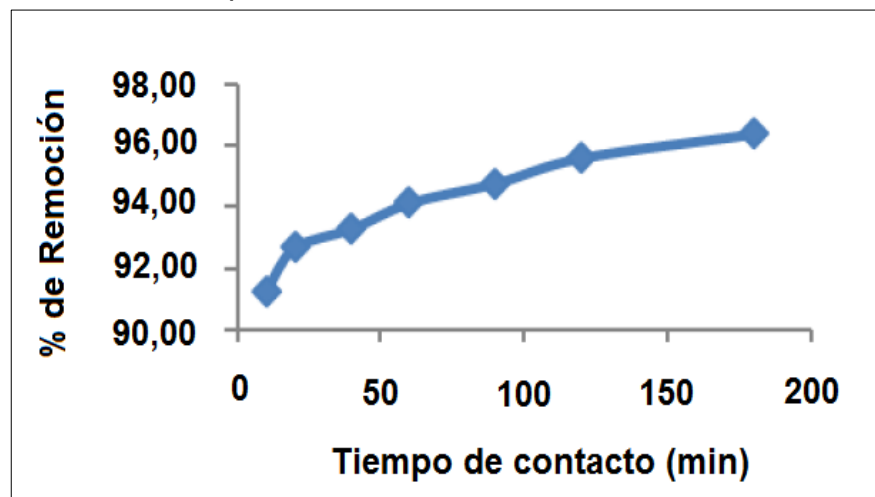
transcurre el tiempo, el colorante se acumula en los sitios vacantes hasta su saturación.

Figura 41. Efecto del tiempo de contacto en la biosorción del colorante AM a partir de la BC



Fuente: BENMAAMAR, Z et al. Removal of methylene blue by adsorption onto coffee residues: Kinetics and equilibrium study. *The International Journal of Multi-disciplinary Sciences*. 2016, Vol. 1, pp. 16

Figura 42. Efecto del tiempo de contacto en la biosorción del colorante VM a partir de la BC

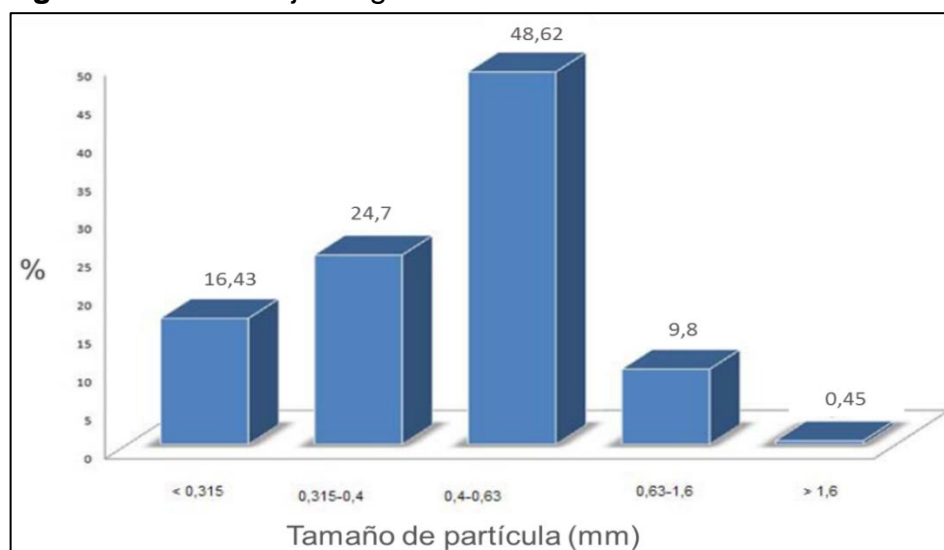


Fuente: ATIRAH, Siti; et al. Malachite Green Adsorption by Spent Coffee Grounds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 318, pp.4.

4.3.5 Tamaño de partícula. La capacidad de biosorción es un fenómeno de superficie que depende de la difusión de la solución con la especie a eliminar hacia los poros capilares de la partícula biosorbente²¹². Por ende un menor tamaño de partícula del biosorbente ofrecerá una mayor cantidad de sitios activos disponibles para la remoción de los colorantes, es decir, un aumento en el área de superficie específica disponible para las interacciones entre los colorantes disueltos y el biosorbente²¹³. Según Ronda “tamaños de partícula demasiado pequeños conlleva a problemas de operación, tales como el aumento de pérdida de carga o la necesidad de una etapa de centrifugación para separar el material”²¹⁴.

En el estudio realizado por Ramos²¹⁵ se determinó el porcentaje de granulometría de la masa total, evidenciando una retención del 70% de la muestra para los tamaños entre 0,63 y 0,315 mm (Figura 43). Encontrando un mayor porcentaje de remoción con tamaños menores a 0,315 mm en los colorantes VM, AM y R40, por el incremento en el área de contacto de la BC como se muestra en la Tabla 20.

Figura 43. Porcentaje de granulometría de la BC



Fuente: RAMOS RINCÓN, Jaidith Marisol. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010, p. 61

²¹²ROMINA. Op. Cit., p. 68.

²¹³REHMAN, Rabia; et al. Influence of Operating Conditions on the Removal of Brilliant Vital Red Dye from Aqueous Media by Biosorption using Rice Husk. *Journal Chemical Society of Pakistan*. 2011, Vol. 33, Nro. 4, pp. 517.

²¹⁴RONDA, Alicia. Preparación y aplicación de biosorbentes activados químicamente para la eliminación de plomo de medios acuosos. Universidad de Granada. 2016. p. 34.

²¹⁵RAMOS. Op. Cit., p. 61.

Tabla 20. Porcentajes de remoción de los colorantes VM, AM y R40 para diferentes tamaños de partícula

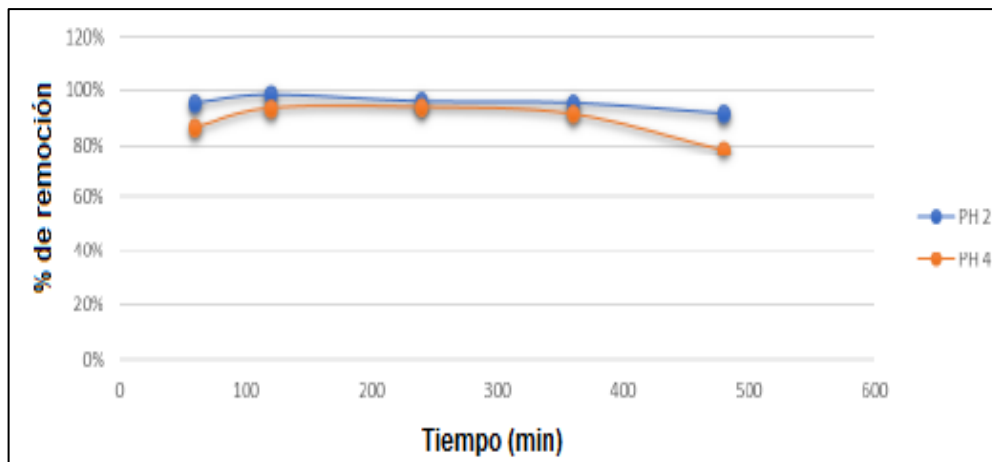
Tamaño de partícula (mm)	Porcentaje de remoción		
	VM	AM	R40
> 1,6	93,65	78,68	6,22
1,6-0,63	96,08	92,78	6,48
0,63-0,4	96,99	97,37	26,39
0,4-0,315	98,89	97,81	42,30
< 0,315	99,23	98,20	64,01

Fuente: elaboración propia con base en: RAMOS RINCÓN, Jaidith Marisol. Estudio del proceso de biosorción de colorantes sobre borra (cuncho) de café. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010, p. 61

Igualmente Torres y Vanegas²¹⁶ analizaron el efecto del tamaño de partícula mediante el método de retención por tamices, obteniendo valores menores a 0,5, entre 0,5-1 y de 1 a 2 mm. A pesar de que el proceso de biosorción normalmente se favorece a menores tamaños de partícula, en esta investigación mejora la eficiencia de remoción con tamaños de partícula entre 1-2mm. Esto se debe a que las partículas de mayor tamaño con forma esférica presentan un incremento en la transferencia de masa en comparación a las partículas de menor tamaño, alcanzando remociones del 98,69% como se ilustra en la Figura 44.

²¹⁶TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 81

Figura 44. Porcentaje de remoción a un tamaño de partícula de 1-2 mm



Fuente: TORRES, Anyel y VANEGAS, Geraldine. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Bogotá, Colombia. Universidad Francisco José de Caldas, 2018. p. 81

Otra de las posibles razones que mencionan los autores se da con respecto al tamaño de la molécula del colorante azul brillante FCF con un alto volumen molecular, lo que ocasiona que sea más propensa a penetrar macro y mesoporos en la superficie del biosorbente. De este modo cuando el ancho del poro es menor al de las moléculas del biosorbato, se genera una disminución en la retención del colorante²¹⁷.

4.3.6 Temperatura. Es uno de los parámetros que afecta tanto la velocidad de difusión de las moléculas del adsorbato, desde la capa externa hacia el interior de la superficie del material biosorbente, como el equilibrio de las interacciones entre las moléculas de la solución y la superficie, dependiendo de la termodinámica del proceso^{218 219}. En la Tabla 21 se presentan las máximas capacidades de biosorción y los porcentajes de remoción a diferentes temperaturas durante el proceso de biosorción de distintos colorantes a partir de BC.

²¹⁷TORRES. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF Op. Cit., p. 81 y 82.

²¹⁸ROMINA. Op. Cit., p. 70.

²¹⁹RONDA. Op. Cit., p. 27.

Tabla 21. Datos bibliográficos sobre la remoción de colorantes con BC a diferentes temperaturas

Biosorbente	Colorante	Temperatura (°C)	q _{máx} (mg/g)	Referencia*
CA de BC modificado con HNO ₃	NM	30	658	Rattanapan, Srikran y Kongsune
CA de BC modificado con H ₃ PO ₄	AM	25	181,8	Reffas, A
BC modificada con KOH	Amarillo Anilina	25	2,58	Pagalan, Efren
BC	Azul de toluidina	20	142,5	Ridha, Lafi
CA de BC modificado con KOH	Naranja ácido 7	30	665,85	Jung, Kyung-Won
BC	AM	30	34,48	Ramos, Jaidith

Fuente: elaboración propia

Como resultado las investigaciones presentadas operan en un rango de temperatura estrecho, en el que la influencia de la misma es mínima en comparación con los demás parámetros que intervienen en el proceso²²⁰. Desde el punto de vista de la aplicación industrial de esta variable, un aumento o disminución en la temperatura resulta ser un factor de poca relevancia, al encarecer la operación una vez sea modificado, por consiguiente se recomienda operar habitualmente a temperatura ambiente²²¹.

Así pues el proceso de biosorción de colorantes sintéticos en el agua depende del acondicionamiento de la BC, con el fin de reducir las interferencias en la cuantificación del analito. Igualmente las diferentes modificaciones y/o activaciones realizadas al biosorbente demuestran un incremento en la capacidad de biosorción o el porcentaje de remoción, además de un cambio en la naturaleza y las propiedades químicas del mismo. Teniendo en cuenta las variables experimentales como el pH, concentración inicial del colorante, dosis de

²²⁰MARTÍN Op. Cit., p. 67.

²²¹RONDA. Op. Cit., p. 27.

*Las referencias completas se encuentran en la bibliografía

biosorbente, tiempo de contacto, tamaño de partícula y temperatura, las cuales son fundamentales en el proceso de remoción de los colorantes. De acuerdo a lo expuesto, se presenta la recopilación de los datos obtenidos para las diferentes publicaciones en la Tabla 22.

Tabla 22. Recopilación de investigaciones con sus respectivos parámetros

Referencia	Colorante	Biosorbente	Variables						% Remoción	qmá x (mg/g)
			pH	Concentración (mg/L)	Dosis biosorbente(g)	Tiempo de contacto (min)	Tamaño de partícula (mm)	T (°C)		
Ramos	AM	BC	10	100	1	120	0,315	30	98,9	34,4
	R40		2	25	2				64,7	8
Torres y Vanegas	Azul brillante FCF	BC activada con H ₃ PO ₄	2	100	1	120	1,00- 2,00	25	98,6	-
Pagalan	Anilina amarillo	CA de BC con KOH	7 9	35	0,6	150	0,200- 0,400	25	88,72	2,58
Rattanapan	NM	CA de BC activada con HNO ₃	3	300	0,05	90	-	30	-	658
Walaikorn	Rojo reactivo 152	Perlas de quitosano y BC	4	50	1	360	-	30	-	4,27
Jung	Naranja ácido 7	Perlas de alginato de calcio y BC	3	200	0,5	1440	0,425	30	97,4	73,5
Pavlovic	CV	BC activada con microondas	6	250	1,5	5,25	-	27	96,9	36,8 2
Ovando	RB	Compuesto de BC y polipirrol	9	200	0,125	120	-	25	-	50,5 9
Wong	Negro reactivo 5	Compuesto de BC y polietilenimina	9	100	0,1	50	<0,500	25	-	77,5 2
	RC	3	106			34,3 6				

Fuente: elaboración propia

4.4 APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LA BORRA DE CAFÉ

La BC como principal residuo obtenido durante la elaboración de la bebida de café en hogares, tiendas, restaurantes, hoteles, industrias entre otras. Presenta una gran cantidad de compuestos orgánicos que pueden ser aprovechados para la producción de telas funcionales con la combinación de botellas recicladas, como alimento nutritivo para la cría de animales, para la producción de biodiesel, fertilizantes o cosméticos y productos de aseo²²². Asimismo, se ha reportado el uso de la BC para la remoción de metales o colorantes sintéticos en el agua, reduciendo el impacto generado por este tipo de contaminantes. Tal es el caso de Kyzas²²³, quien estudió el uso de la BC griega para la decoloración de aguas residuales propias de la industria textil, estimando que cerca del 10 al 50% de los colorantes reactivos usados se vierte en los efluentes, provocando daños ambientales²²⁴. A menudo la eliminación de colorantes en esta industria, se centra en los de tipo reactivo por su creciente participación en el mercado para ser usados en el teñido de fibras de algodón, sin embargo las plantas de tratamiento de aguas residuales convencionales presentan una baja remoción de este contaminante y de otros colorantes solubles aniónicos, lo que conlleva a colorear las vías fluviales. Por consiguiente Kyzas menciona el uso de la BC como una clara alternativa que puede ser aprovechada para la remoción de efluentes reales, originado directamente del baño de tintura de las fibras, al ser un biosorbente con costo cero el cual fue adecuado previamente mediante pretratamientos de lavado, secado y tamizado, sin ser tratados químicamente. Evidenciando que el efluente real suministrado presentó concentraciones de 197, 223 y 280 mg/L para los colorantes remazol azul, rojo y amarillo respectivamente, de acuerdo a los resultados medidos a partir de espectrofotometría UV-Vis²²⁵. De este modo el factor clave durante el proceso de biosorción fue la variable de la dosis de biosorbente que fue evaluado en un rango de 1-10 g/L a 25°C durante 24h, con un valor de pH natural de 10, es decir el valor original de alcalinidad propia del efluente textil, con el fin de evitar costos adicionales por la regulación del pH durante el proceso de biosorción²²⁶. Ilustrando un aumento significativo en la remoción de los colorantes del efluente real, al aumentar la dosis del biosorbente,

²²²TRUJILLO, Juan. Innovación estratégica para negocios con borra de café en la localidad de Teusaquillo-Bogotá. Universidad Tecnológica de Bolívar – Corporación Universitaria Minuto de Dios, 2019. p. 40, 41 y 42.

²²³KYZAS. A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. Op. Cit., p. 2070.

²²⁴BLACKBURN, Richard. Natural polysaccharides and their interactions with dye molecules: Applications in effluent treatment. *Environ. Sci. Technol.* 2004, Vol. 38, pp. 4906.

²²⁵Ibíd., p. 2073.

²²⁶Ibíd., 2075 y 2079.

además de presentar un equilibrio gradual en el lapso de 30-180 min, el cual llega a la meseta de equilibrio en el periodo de 3-24 h, con una máxima capacidad de biosorción de 179 mg/g²²⁷. De este modo se muestra que el uso de la BC es un material eficaz para la biosorción tanto de colorantes de aguas sintéticas como de aguas reales presentes en las industrias textiles, lo que brinda una clara expectativa sobre su uso que le da un valor agregado importante y que a su vez permite la reducción de contaminación provocada de este residuo agroindustrial si no llega ser aprovechado.

²²⁷Ibíd., 2079 y 2085

5. CONCLUSIONES

- Se demuestra un aumento considerable en el número de estudios publicados acerca del uso de la borra de café para la biosorción de colorantes sintéticos en el agua durante los últimos 18 años. Evidenciando la tendencia actual de las investigaciones y la importancia de factores como la preparación o modificación de la biomasa, las caracterizaciones empleadas y las variables experimentales del proceso.
- Se identificaron las principales metodologías de caracterización de la borra de café mediante un levantamiento de información, que permitió recopilar y seleccionar los métodos más usados en las diferentes publicaciones. Siendo el punto de carga cero, la microscopía electrónica de barrido, las isotermas de Brunner-Emmet-Teller y la espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier. Las técnicas que brindaron información del valor de pH más propicio para alcanzar un proceso de biosorción eficiente, al igual que la morfología, la estructura y la composición química del biosorbente.
- Se establecieron las variables que influyen en la remoción de colorantes sintéticos en el agua como son la adecuación de la materia prima y las modificaciones en el material bajo el uso de agentes ácidos, básicos, magnéticos, por activación con microondas o compuestos poliméricos, que buscan adecuar y aumentar las propiedades biosortivas de la borra de café. Al igual de la influencia de variables como el pH, la concentración del colorante, la dosis de biosorbente, el tiempo de contacto, el tamaño de partícula y la temperatura. Las cuales afectan tanto la capacidad de biosorción como el porcentaje de remoción de colorantes sintéticos en el agua.

6. RECOMENDACIONES

- Con el fin de profundizar el estudio de biosorción de colorantes sintéticos disueltos en el agua, se recomienda indagar en la termodinámica del proceso, los ciclos de vida útil después de la desorción del material y la disposición final del contaminante.
- Igualmente evaluar las isothermas de adsorción y el comportamiento cinético del proceso de biosorción de colorantes a partir de la BC y la BC modificada.
- Aplicar los fundamentos teóricos expuestos a escala laboratorio para la remoción de diferentes colorantes o contaminantes presentes en las fuentes hídricas a partir de la BC u otros residuos lignocelulósicos como potenciales biosorbentes.

BIBLIOGRAFÍA

AJMAL, Anila; MAJEED, Imran; NASEEM MALIK, Riffat; IDRIS, Hicham y AMTIAZ NADEEM, Muhammad. Principles and mechanisms of photocatalytic dye degradation on TiO₂ based photocatalysts: a comparative overview. *The Royal Society of Chemistry*. 2014, Vol. 4, Nro. 70, pp. 37003-37026.

ALEA MARTÍNEZ, Yadiel Rafael. Estudio de diferentes materiales biosorbentes para la remoción de azul de metileno en medio acuoso. Trabajo de diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Facultad de química y farmacia. 2018. 89 p.

ALEMÁN ROMERO, Arnulfo Leonardo. Evaluación de la esterificación sobre cascarilla de arroz como estrategia para incrementar la capacidad de remoción del colorante rojo básico 46. Trabajo de magister en ciencias-química. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia Sede-Medellín. Facultad de ciencias-Escuela de química. 2012. 92 p.

AMARINGO VILLA, Fredy Alberto y HORMAZA ANAGUANO, Angelina. Determinación del punto de carga cero y punto isoeléctrico de dos residuos agrícolas y su aplicación en la remoción de colorantes. *Revista de investigación Agraria y Ambiental*. 2013, Vol. 4, Nro. 2, pp. 27-36.

ANASTOPOULUS, Ioannis; KARAMESSOUTI, Mina; MITROPOULOS, Athanasios C y KYZAS, George Z. A review for coffee adsorbents. *Journal of Molecular Liquids*. 2017, Vol. 229, pp. 555-565.

ANGARITA DAZA, Fernando Arturo. Borra de café como material adsorbente para la remoción de cromo (III). Trabajo de grado para optar al título de ingeniero ambiental. Bogotá, Colombia. Universidad Libre Sede Bogotá. Facultad de ingeniería ambiental. 2013. 43 p.

APPEL, Chip; MA, Lena Q; RHUE, R. Dean y KENNELLEY, Elizabeth. Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma*. 2003, Vol. 113, pp. 77-93.

ARGEÑAL NAVARRO, Wesling Nazarith, ESPINOZA SOTO, Alicia Estela y MORENO GUIDO, Valeska Cecilia. Determinación de parámetros físicos y químicos en café molido. Trabajo para optar el título de licenciado en química. León, Nicaragua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua UNAN-LEÓN. Facultad de ciencias y tecnología. Departamento de química. 2015. 81 p.

ATIRAH MAT, Siti Syamimie; HANANI SYED ZUBER, Sharifah Zati; ENCHE AB RAHIM, Siti Kartini; AHMAD SOHAIMI, Khairunissa Syairah; ABDUL HALIM, Noor Amirah; FAUZIAH ZAINUDIN, Nor; AIDA YUSOFF, Nor; MUNIRAH ROHAIZAD, Nor; HIDAYAH ISHAK, Noor; ANUAR, Adilah y SHARIZAN MD SARIP, Mohd. Malachite Green Adsorption by Spent Coffee Grounds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, Vol. 318, pp.1-8.

AUTA, M y HAMEED, B.H. Optimized waste tea activated carbon for adsorption of Methylene Blue and Acid Blue 29 dyes using response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*. 2011, Vol. 175, pp. 233-243.

BALLAV, Niladri; MAITY, Arjun y MISHRA, Shivani B. High efficient removal of chromium (VI) using glycine doped polypyrrole adsorbent from aqueous solution. *Chemical Engineering Journal*. 2012, Vol. 198, pp. 536-546.

BENMAAMAR, Z; BOUTOUMI, H; BENMAAMAR, H; MAZARI, S; BENMAAMAR, Abdessamed; BENMAAMAR; Abdelamek; SEMSARI, S y AGGOUN, A. Removal of methylene blue by adsorption onto coffee residues: Kinetics and equilibrium study. *The International Journal of Multi-disciplinary Sciences*. 2016, Vol. 1, pp.10-29. ISSN: 2421-9606.

BERGOLLA, Samuel. Colorantes. [en línea]. Scribd: 2012. [Consultado 05, febrero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/uyBjweV>

BLACKBURN, Richard S. Natural polysaccharides and their interactions with dye molecules: Applications in effluent treatment. *Environ. Sci. Technol*. 2004, Vol. 38, pp. 4905-4909.

BROCHE GALINDO, María Hertha; RODRIGUEZ RICO, Iván Leandro; COCA RIVES, Yoandi y CALERO DE HOCES, Mónica. Caracterización de los residuos agrícolas de sorgo para su uso como material biosorbente de colorantes. *Revista Centro de Azúcar*. 2018, Vol. 45, Nro. 4, pp. 64-75. ISSN 2223-4861.

BROLLO, G; CAPPuccio, R y NAVARINI, L. Acidity in coffee: Bridging the gap between chemistry and psychophysics. 22nd International Conference on coffee Science, Capinas. 2008, pp. 270-280.

CALERO, M; HERNÁNZ, F; BLÁZQUEZ, G; MARTÍN-LARA, M.A y TENORIO, G. Efecto de diferentes tratamientos químicos en las características sorbentes de residuos. Derivados de la industria olivarera. *Afinidad LXVII*. 2010, pp. 268-278

CARVAJAL BERNAL, Ana María. Modificación química de carbones activados y su efecto en la adsorción de compuestos fenólicos. Trabajo de investigación para optar al título de magister en ciencias-química. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Departamento de química. 2014. 87 p.

CASTELLAR ORTEGA, Grey Cecilia; CELY BAUTISTA, María Mercedes; CARDOZO ARRIETA, Beatriz María y ROSALES DÍAZ, Cristian Lerroy. Aprovechamiento de la borra de café para la producción de carbón activado y su evaluación en la adsorción del colorante azul marino directo. Memorias III seminario internacional de ciencias ambientales SUE-Caribe. 2017, pp. 43-44.

CASTELLAR ORTEGA, Grey Cecilia; CELY BAUTISTA, María Mercedes; CARDOZO ARRIETA, Beatriz María; ANGULO MERCADO, Edgardo Ramón y PLAZA VEGA, Martín Elías. Adsorción del colorante azul directo 2 sobre borra de café en una columna de lecho fijo a escala laboratorio. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 2018, Vol. 21, Nro. 2, pp. 531-541.

CASTELLAR, Grey; ANGULO, Edgardo; ZAMBRANO, Alejandra y CHARRIS, Dianis. Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*. 2013, Vol. 16, Nro. 1, pp. 263-271.

CENICAFÉ. Manejo de subproductos. Centro Nacional de Investigaciones de Café. [en línea]. 2016. [Consultado 6, septiembre de 2019]. Disponible en: <https://cutt.ly/dyNlqdx>

CHACUA MOJICA, Daniela y RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, Mónica Alejandra. Evaluación de los polifenoles extraídos a partir de residuos de Coffea arábica, para la producción de un coagulante natural. Trabajo de investigación para optar el título de ingeniero químico. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América. Facultad de ingenierías. Departamento de ingeniería química. 2018. 91 p.

CHAPARRO, Cinthia; CABANAZO, Rafael; y MEJÍA OSPINO, Enrique. Estudio de la adsorción de azul de metileno sobre óxido de grafeno. *Revista Colombiana de Materiales*. 2014, Nro. 5, pp. 131-139.

CHIANG, Chih Hao; CHEN, Jian y LIN, Jarrn Horng. Preparation of pore-size tunable activated carbon derived from waste coffee grounds for high adsorption capacities of organic dyes. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2020, Vol. 8, Nro. 4, pp. 103929.

CIFUENTES, Valerie. Durante 2018 la producción de café mundial fue de 168 millones de sacos de 60 kg. [en línea]. La república: 2019. [Consultado 4, septiembre, 2019]. Disponible en: <https://cutt.ly/LyNk9M8>

COCA RIVES, Yoandy. Remoción de azul de metileno en medio acuoso utilizando residuos agrícolas de sorgo (RAS). Trabajo de diploma. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Facultad de ingeniería química y farmacia. Departamento de ingeniería química. 2016. 119 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD PÚBLICA. Decreto 475 de 1998. Por el cual se expiden normas técnicas de calidad del agua potable. [en línea]. Santa Fe de Bogotá, D.C.: El Ministerio, 1998. 2 p. [Consultado 19, febrero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/zrMK76O>

COLPAS, Fredy; TARÓN, Arnulfo y FONG, Waldyr. Análisis del desarrollo textural de carbones activados preparados a partir de zuro de maíz. *Temas Agrarios*. 2016, Vol. 20, Nro. 1, pp. 103-112.

DAI, Yingjie; ZHANG, Danfeng; YAN, Hong; JI, Yan; WU, Wenting y TANAKA, Shunitz. Effect of contact time, solution pH, dosage of adsorbent, and regeneration on adsorption behavior of lead using nitric acid treated carbon material. *Fresenius Environmental Bulletin*. 2016, Vol. 25, Nro. 9, pp. 3417-3422.

DAI, Yingjie; ZHANG, Kexin; ZHANG, Danfeng y CHEN, Yanjun. Kinetic and Equilibrium Studies of Neutral Red Adsorption onto Spent Ground Coffee from Aqueous Solution. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2016, Vol. 38, Nro. 05, pp. 836-842.

DIARIO ECOLOGÍA. [en línea]. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Mi7RLJ6>

ECHARRI, Luis. Ciencias de la tierra y del medio ambiente [en línea]. Libro electrónico, Ed. Teide. 1998. Cap 11. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/SyVPn4g>

ENSUNCHO, Adolfo; ROBLES, Juana y CARRIAZO, José. Adsorción del colorante amarillo anaranjado en solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos a partir de desechos agrícolas. *Sociedad Química de Perú*. 2015, Vol. 81, Nro. 2, pp. 135-147. ISSN 1810-634X.

FERMÍN, Nayive; GALÁN, Hortensia; GARCÍA, José y BRACHO, Nelson. Evaluación de la calidad fisicoquímica y sensorial de tres marcas comerciales de café tostado y molido. *UDO Agrícola*. 2012, Vol. 2, Nro. 2, pp. 428-438.

FERNANDEZ, M.E; NUNELL, G.V; BONELLI, P.R; y CUKIERMAN, A.L. Procesamiento de cáscaras generadas en la industrialización de naranjas para su empleo como biosorbente en la remoción de efluentes coloreados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2011, Vol.15, pp 7-12. ISSN 0329-5184.

FRANCA, Adriana; OLIVEIRA, Leandro y FERREIRA, Mauro. Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee Grounds. *Desalination*. 2009, Vol. 249, Nro. 1, pp. 267-272.

GALANAKIS, Charis M. Healthy components of coffee processing by-products. En: Handbook of coffee processing by-products. Chania, Grecia: Academic Press, 2017. 27-51.

GALLARDO, Erika; MAIOCO, Silvia y FRANCOIS, Nora. Remoción de un colorante básico con quitosano y con un material compuesto de quitosano-zeolita. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ingeniería. 2008. 14 p.

GALLEGO PUNZANO, Jessica. Empleo de biosorbentes como aditivos en cementos: caracterización y aplicaciones en la eliminación de contaminantes ambientales. Trabajo de master de ciencia y tecnología de materiales. Universidad de Oviedo. 2014. 92 p.

GARCÉS JARABA, Luz Ercilia y COAVAS ROMERO, Susana Cecilia. Evaluación de la capacidad de adsorción en la cáscara de naranja (*citrus sinensis*) modificada con quitosano para la remoción de Cr (vi) en aguas residuales. Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Cartagena: Universidad de Cartagena, Facultad de Ingenierías, Programa de Ingeniería Química, 2012. 129 p.

GARZON JIMENEZ, Rossana Catherine. Cinética de degradación de colorantes textiles de diferentes clases químicas por hongos y bacterias inmovilizados sobre fibra de Agave tequilana Webber var. Azul. Bogotá D.C: Pontificia Universidad Javeriana, 2009. 137.p

GAUR, Nisha; FLORA, Gagan; YADAV, Mahavir y TIWARI, Archana. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals. *Royal Society of Chemistry*. 2014, Vol. 16, Nro. 2, pp. 180-193.

GONZÁLEZ, Miguel y HERNÁNDEZ, Alma. De la micrografía al arte generativo. *Investigación en discapacidad*. 2014, Vol. 3, Nro. 3, pp. 147-150.

GUZMÁN, Héctor. Eficiencia energética y energías limpias. [en línea]. OPEN oportunidades de mercado para energías limpias y eficiencia energética: 2011. [Consultado 02, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/VyNjhic>

HIDALGO SEGOVIA, Carla Solange y RIVERA GARCÉS, Solange Giuliana. Obtención de carbón activado a partir del bagazo de café como una propuesta de utilización del residuo de una industria cafetera. Trabajo de grado en ingeniería química. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de ciencias naturales y matemáticas. 2017. 106 p.

HINCAPIÉ MEJÍA, Gina; CARDONA CUERVO, Sebastián y RÍOS, Luis Alberto. Estudio termodinámico de la adsorción de un colorante azóico por medio de un residuo lignocelulósico en medio acuoso. *Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte*. 2018, Vol. 36, Nro. 1, pp. 97-118. ISSN 0122-3461.

HIRATA, Mizuho; KAWASAKI, Naohito; NAKAMURA, Takeo; MATSUMOTO, Kazuoki; KABAYAMA, Mineaki; TAMURA, Takamichi y TANADA, Seiki. Adsorption of dyes onto carbonaceous materials produced from coffee Grounds by microwave treatment. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002, Vol. 254, Nro.1, pp. 17-22.

HORACIO LÓPEZ, Raúl. Caracterización de medios porosos y proceso percolativos y de transporte. Tesis para optar al grado de Doctor en física. San Luis, Argentina: Universidad de San Luís. Facultad de ciencias físico-matemáticas y naturales. Departamento de física. 2002. 86 p.

HORMAZA, Angelina y SUAREZ GARCÍA, Edgar. Estudio del proceso de biosorción de dos colorantes estructuralmente diferentes sobre residuos avícolas. *Sociedad Química de Perú*. 2009, Vol. 75, Nro. 3, pp. 329-338. ISSN 1810-634X.

IPOHORSKI, Miguel y BOZZANO, Patricia B. Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e investigación*. 2013, Vol. 63, Nro. 3, pp. 43-53.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166. Bogotá D.C. El instituto, 2018 ISBN 9789588585673 153 p.

JUNG, Kyung Won; HYUN CHOI, Brian; HWANG, Min Jin; CHOI, Jae Woo; LEE, Sang Hyup; CHANG, Jae Soo y AHN, Kyu Hong. Adsorptive removal of anionic azo dye from aqueous solution using activated carbon derived from extracted coffee residues. *Journal of Cleaner Production*. 2017, Vol. 166, pp. 360-368.

JUNG, Kyung Won; HYUN CHOI, Brian; HWANG, Min Jin; JEONG, Tae Un y AHN, Kyu Hong. Fabrication of granular activated carbons derived from spent coffee grounds by entrapment in calcium alginate beads for adsorption of acid orange 7 and methylene blue. *Bioresource Technology*. 2016, Vol. 219, pp. 185-195.

KEBEDE, TIGIST. Spent coffee grounds modified Fe –Al- Zr Nano- Composites for the removal of acid brown 75 dye from tannery waste. Addis Ababa, Ethiopia: Addis Ababa University. 2018, 119 p.

KOPSIDAS, Odysseas. Batch studies for methylene blue removal and recovery by untreated coffee residues. *Journal of Environmental Science and Engineering*. 2017, Vol. 6, pp. 487-495.

KYZAS, George Z. A Decolorization Technique with Spent “Greek Coffee” Grounds as Zero-Cost Adsorbents for Industrial Textile Wastewaters. *Materials*. 2012, Vol. 5, Nro. 11, pp. 2069-2087.

KYZAS, George Z.; LAZARIDIS, Nikolaos K. y MITROPOULOS, Athanassios Ch. Removal of dyes from aqueous solutions with untreated coffee residues as potential low-cost adsorbents: Equilibrium, reuse and thermodynamic approach. *Chemical Engineering Journal*. 2012, Vol. 189-190, pp. 148-159.

LAFI, Ridha; BEN FRADJ, Anouar; HAFIANE, Amor y HAMEED, BH. Coffee waste as potential adsorbent for the removal of basic dyes from aqueous solution. *Korean Journal Chemical Engineer*. 2014, Vol. 31, Nro, 12, pp. 2198-2206.

LAFI, Ridha; MONTASSER, Imed y HAFIANE, Amor. Adsorption of congo red dye from aqueous solutions by prepared activated carbon with oxygen-containing functional groups and its regeneration. *Adsorption Science & Technology*. 2019, Vol. 37, Nro. 1-2, pp. 160-181.

LEGUIZAMÓN, Juliana; QUIÑONES, César; ESPINOSA, Hilda y SARRIA, Víctor. Fotosensibilización de TiO₂ con un colorante comercial para fotodegradación de contaminantes orgánicos en agua. *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*. 2010, Vol. 13, Nro. 2, pp. 185-190.

LERICI, Laura C; VARELA LOPEZ, Claudio; LEAL MARCHENA, Candelaria; VINUESA, Ariel; DIGUILIO, Eliana; RENZINI; María S y CAMPOS FIGUEROA, Cristian. Photocatalytic decoloration of alizarin s red employing iron nanocatalysts. *Revista tecnología y Ciencia*. 2019, Nro. 36, pp. 105-114.

MARCANO, Deanna. Introducción a la Química de los Colorantes. Caracas, Venezuela: *Divulgación Científica Y Tecnológica*, 2018. 254 p. ISBN: 9789806195592

MARTÍN LARA, María Ángeles. Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados. Tesis doctoral. España. Universidad de Granada. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química. 2008. 345 p.

MARTÍNEZ SUÁREZ, Jaime Fernando. Comportamiento electroquímico de colorantes antraquinónicos, azul de metileno, y compuestos afines en la solución de solventes no-acuosos. Trabajo de tesis doctoral. Universidad Nacional de la Plata. Facultad de ciencias exactas. Departamento de química. 2017. 325 p.

MONDRAGÓN, Pedro. Espectroscopia de infrarrojo para todos. 1 ed. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., 2017, 199 p. ISBN 9786079754846.

MONTES ALBA, Erika Janneth. Estudio de biosorción de ácido rojo 112 y básico azul 3 sobre tallo de girasol. Trabajo de grado de ingeniero ambiental. Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Ambiental. 2014. 67 p.

MORENO, Anderson; FIGUEROA, Danilo y HORMAZA, Angelina. Adsorción de azul de metileno sobre cascarilla de arroz. *Producción más limpia*. 2012, Vol. 7, Nro. 1, pp. 9-18.

MOUSSA, Abbas; ABDELHAMID, Cherfi; SAMIA, Kaddour; TOUNSIA, Aksil y MOHAMED, Trari. Kinetic and equilibrium studies of coomassie blue G-250 adsorption on apricot stone activated carbon. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*. 2015, Vol. 5, Nro. 2, pp 1-8.

NAMANE, A; MEKARZIA, A; BENRACHEDI, K; BELHANECHÉ BENSEMRA, N y HELLAL, A. Determination of the adsorption capacity of activated carbon made from coffee grounds by chemical activation with $ZnCl_2$ and H_3PO_4 . *Journal of Hazardous Materials*. 2005, Vol. 199, Nro. 1-3, pp. 189-194.

NAVARRETE, Luisa Fernanda; GIRALDO, Liliana; BAQUERO, María Cristina y MORENO, Juan Carlos. Carbón activado: Efecto del lavado con ácido sulfúrico del precursor lignocelulósico, cuesco de palma africana, sobre los procesos de carbonización y activación. *Revista Colombiana de química*. 2005, Vol. 34, Nro, 1, pp. 67-78.

NITAYAPHAT, Walaikorn. Chitosan/coffee residue composite beads for removal of reactive dye. *Materials Today: Proceedings*. 2017, Vol. 4, pp. 6274-6283.

NITAYAPHAT, Walaikorn; JINTAKOSOL, Thanut; ENKASETH, Kamontip y WANRAKAKIT, Yada. Removal of methylene blue from aqueous solution by coffee residues. *Chiang Mai Journal of Science*. 2015, Vol. 42, Nro. 2, pp. 407-416.

OMENAT MORÁN, Delia. Modificación química de carbones activados con ácidos minerales. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. Departamento de química orgánica e inorgánica. 2016. 262 p.

OVANDO MEDINA, Víctor M; DÁVILA GUZMÁN, Nancy E; PÉREZ AGUILAR, Nancy V; MARTÍNEZ GUTIÉRREZ, Hugo; ANTONIO CARMONA, Iveth D; MARTÍNEZ AMADOR, Silvia y DECTOR, Andrés. A semi-conducting polypyrrole/coffee Grounds waste composite for rhodamine B dye adsorption. *Iranian Polymer Journal*. 2018, Vol. 27, pp. 171-181.

PAGALAN, Efren; SEBRON, Michell; GOMEZ, Shaiana; JANE SALVA, Sheena; AMPUSTA, Renzey; JOY MACARAYO, Aira; JOYNO, Cherry; IDO, Alexander y ARAZO, Renato. Activated carbon from spent coffee grounds as an adsorbent for treatment of water contaminated by aniline yellow dye. *Industrial Crops & Products*. 2020, Vol. 145, pp. 111953

PAREDES MARTÍNEZ, Benigna Irene. Análisis y obtención de colorante natural a partir de la *Baccharis Latifolia* (Chilca). Trabajo de investigación ingeniero textil. Ibarra, Ecuador. Universidad Técnica del Norte. Facultad de ciencias aplicadas. Escuela de Ingeniería Textil. 2002. 137 p.

PARRA ORTEGA, Verónica Paz. Estudio comparativo en el uso de colorantes naturales y sintéticos en alimentos, desde el punto de vista funcional y toxicológico. Trabajo de investigación Licenciado en Ciencias de los Alimentos. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias. Escuela de Ingeniería en Alimentos. 2004. 86 p.

PAVLOVIC, Marija D; BUNTIC, Aneta V; MIHAJLOVSKI, Katarina R; SILER MARINKOVIC, Slavica S; ANTONOVIC, Dusan G; RADOVANOVIC, Zeljko y DIMITRIJEVIC BRANKOVIC, Suzana I. Rapid cationic dye adsorption on polyphenol-extracted coffee grounds-A response surface methodology approach. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2014, Vol. 45, Nro. 4, pp. 1691-1699.

PINEDA, José. Contaminación del agua, causas, consecuencias y soluciones. [en línea]. encolombia. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/frMJFwd>

PIÑA MONDRAGÓN, Scherezada. Decoloración biológica del colorante azul directo 2 en un filtro anaerobio/aerobio. Trabajo de maestría en ingeniería ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y doctorado en ingeniería. 2007. 98 p.

PIQUÉ, Teresa M y VÁZQUEZ, Analía. Uso de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y Cemento. Investigación y desarrollo*. 2012, Vol. 3, Nro. 2, pp. 62-71. ISSN 2007-3011.

QUÍMICA.ES. Anfótero. [en línea]. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Hi7Q9jD>

RAJA, Pavan y BARRON, Andrew. Physical methods in chemistry and nano Science. [en línea]. openstax cnx. [Consultado 12, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/dogeMUd>

RAMOS RINCÓN, Jaidith Marisol. Estudio Del Proceso De Biosorción De Colorantes Sobre Borra (Cuncho) De Café. Trabajo de maestría ciencias-química. Bogotá, D.C. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. Departamento de Química. 2010. 128 p.

RATTANAPAN, Supaporn; SRIKRAM, Jiraporn y KOGSUNE, Panita. Adsorptive of methylene orange on coffee grounds activated carbon. *Energy Procedia*. 2017, Vol. 138. pp. 949-954.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Biodegradación. [en línea]. Madrid: 2019. [Consultado 25, junio, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Yi7Ev0u>

REFFAS, A; BERNARDET, V; DAVID, B; REINERT, L; LEHOCINE, M Bencheikh; DUBOIS, M; BATISSE, N y DUCLAUX, L. Carbons prepared from coffee grounds by H₃PO₄ activation: Characterization and adsorption of methylene blue and Nylosan Red N-2RBL. *Journal of Hazardous Materials*. 2010, Vol. 175, Nro. 1-3, pp. 779-788.

REHMAN, Rabia; ANWAR, Jamil; MAHMUD, Tariq; SALMAN, Muhammad y SHAFIQUE, Umer. Influence of Operating Conditions on the Removal of Brilliant

Vital Red Dye from Aqueous Media by Biosorption using Rice Husk. *Journal Chemical Society of Pakistan*. 2011, Vol. 33, Nro. 4, pp. 515-521.

REHMAN, Rabia; MAHMUD, Tariq, ANWAR, Jamil; SALMAN, Muhammad; SHAFIQUE, Umer; ZAMAN, Wahhed Uz y ALI, Furqan. Removal of alizarin red s (dye) from aqueous media by using alumina as an adsorbent. *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2011, Vol. 33, Nro. 2, pp. 228-232.

RIAÑO LUNA, Elías. Tecnología del café. [en línea]. issue: 2019. [Consultado 02, mayo, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/JyNB6tJ>

ROH, Jinkyu; NEE UMH, Ha; MO YOO, Chang; RENGARAJ, Selvaraj; LEE, Byunghwan y KIM, Younghun. Waste coffee-grounds as potential biosorbents for removal of acid dye 44 from aqueous solution. *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2012, Vol. 29, Nro. 7, pp. 903-907.

ROMERO CANO, Luis Alberto. Preparación y uso de cáscaras de naranja como biosorbente para la remoción de compuestos orgánicos. Trabajo de maestría en ciencia y tecnología en la especialidad de ingeniería ambiental. Santiago de Querétaro, México: Centro de Investigación y Desarrollo tecnológico en Electroquímica. 2013. 113 p.

ROMINA AVILA, Cintia. Remoción de azul de metileno en agua empleando bagazo de Agave Salmiana como biosorbente. Trabajo de maestría en ciencias ambientales. San Luis de Potosí, México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultades de ciencias químicas, ingeniería y medicina. 2011. 100 p.

RONDA, Alicia. Preparación y aplicación de biosorbentes activados químicamente para la eliminación de plomo de medios acuosos. Tesis doctoral de química. Universidad de Granada. Facultad de ciencias. 2016. 241 p.

RUIZ BALAGUERA, Sonia Esperanza. Evaluación de la remoción del colorante índigo utilizado en empresas dedicadas a la producción de telas tipo denim empleando a *Pleutorus ostreatus* como modelo biológico. Trabajo master en diseño y gestión de procesos. Bogotá, D.C. Universidad de la Sabana. 2011. 94 p.

SAFARIK, Ivo; HORSKA, Katerina; SVOBODOVA, Barbora y SAFARIKOVA, Mirka. Magnetically modified spent coffee Grounds for dyes removal. *European Food Research and Technology*. 2012, Vol. 234, Nro. 2, pp. 345-350.

SANCHÓN, MV. Contaminación del agua. [en línea]. Salud pública y AP de salud. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/TrMKbmb>

SCHIEWER, Silke y VOLESKY, Bohumil. Modeling of the proton-metal ion exchange in biosorption. *Environmental Science & Technology*. 1995, Vol. 29, Nro. 12, pp. 3049-3058.

SCOPUS. Análisis de resultados. Documentos por año. [en línea]. [Consultado 7, julio, 2020]. Disponible en: Base de datos Scopus

SCUTERI, Marta. Aditivos alimentarios. [en línea]. Slideplayer. [Consultado 12, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/Nr1dZI6>

SERRANO MARTINEZ, José. Espectroscopia Infrarroja 1-Fundamentos. Trabajo de posgrado en ingeniería del agua y del terreno. Universidad Politécnica de Cartagena. 2004. 35 p.

SHAWAL, Nasri; JIBRIL, Mohammed; MUHAMMAD, Ahmad; DADUM, Hamza; HUSNA, Mohd y NASIR, Ani. Characteristics of Potassium Acetate - Activated Coconut Shell Carbon. *Advanced Materials Research*. 2014, Vol. 1043, pp. 193-197.

SIERRA ALONSO, Isabel; GÓMEZ RUÍZ, Santiago; PÉREZ QUINTANILLA, Damián y MORANTE ZARCERO, Sonia. Análisis instrumental. 1 ed. España: netbiblo, 2010. 238 p. ISBN 9788497453776.

SIVASHANKAR, R; SATHYA, A.B; VASANTHARAJ, K y SIVASUBRAMANIAN, V. Magentic composite an environmental super adsorbent for dye sequestration - A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2014, Vol. 1-2, pp. 36-49.

SLIMANI, Rachid; OUAHABI, Imane; ABIDI, Ferid; HADDAD, Mohammadine; REGTI, Abdelmajid; LAAMARI, My Rachid; ANTRI, Said; y LAZAR, Said. Calcined eggshells as a new biosorbent to remove basic dye from aqueous solutions. Thermodynamics, kinetics, isotherms and error analysis. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2013, Vol. 45, Nro. 4, pp. 1578-1587.

SOLIS MEJÍA, Ludibeth. Evaluación del fosfato de hierro (III) como material reactivo para la remoción de uranio en agua. Trabajo de maestría en ciencias ambientales. Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de química. 2004. 110 p.

SRIVASTAVA, Vimal C; SWAMY, Mahadeva M; MALL, Indra D; PRASAD, Basheswar y MISHRA, Indra M. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash

and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2006, Vol. 272, pp. 89-104.

TAN, N; SLENDERS, P; SVITELSKAYA, A y FIELD, J.A. Degradation of azo dye mordant yellow 10 in a sequential anaerobic and bioaugmented aerobic bioreactor. *Water Science and Technology*. 2000, Vol. 42, Nro. 5-6, pp. 337-344.

TISSOT, Florencia. Contaminación en agua. [en línea]. Docplayer: 2010. [Consultado 08, enero, 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/trML5BG>

TORRES GALINDO, Anyel Liseth y VANEGAS LÓPEZ, Geraldine Jasbleidy. Evaluación de la capacidad de adsorción de la corteza de naranja (*Citrus Sinensis*), bagazo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum*) y borra de café (*Coffea Arábica*) para la remoción del colorante azul brillante FCF. Trabajo de investigación Ingeniero Sanitario. Bogotá, D.C. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad del medio ambiente y recursos naturales. 2018. 109 p.

TORRES HURTADO, Tatiana Lee y MORA HUERTAS, Claudia Elizabeth. Aplicación de la microscopía electrónica de barrido en la evaluación de dos materias primas cosméticas como restauradora de la cutícula. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*. 2010, Vol. 39, Nro. 1, pp. 5-20. ISSN 0034-7418.

TRUJILLO FLECHAS, Juan David. Innovación estratégica para negocios con borra de café en la localidad de Teusaquillo-Bogotá. Trabajo de maestría en gestión de la innovación. Universidad Tecnológica de Bolívar – Corporación Universitaria Minuto de Dios. 2019. 169 p.

VARGAS CORREDOR, Yury Alexandra y PÉREZ PÉREZ, Liliana Ibeth. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*. 2018, Vol. 14, Nro. 1, pp. 59-72. ISSN 1900-4699.

VARGAS LAZO, Angélica María. Estudio de la producción de pellets a partir de borra de café. Trabajo de investigación de magister en ingeniería química. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ingeniería. 2018. 119 p.

VINU, R y NAIR, Vaishakh. Peroxide-assisted microwave activation of pyrolysis char for adsorption of dyes from wastewater. *Bioresource Technology*. 2016, Vol. 216, pp. 511-519.

WEN, Xin; LIU, Hansong; ZHANG, Lu; ZHANG, Jing; FU, Can; SHI, Xiaoze; CHEN, Xuecheng; MIJOWSKA, Ewa; CHEN, Ming Jun y WANG, De Yi. Large-scale converting waste coffee grounds into functional carbon materials as high efficient adsorbent for organic dyes. *Bioresource Technology*. 2019, Vol. 272, pp. 92-98.

WONG, Syieluing; ABD GHAFAR, Nawal; NGADI, Norzita; AMIRAH RAZMI, Fatin; MOHAMMED INUWA, Ibrahim; MAT, Ramli y SAIDINA AMIN, Tampoco Aishah. Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific reports*. 2020, Vol. 10, Nro. 1, pp. 1-13.

ZUBIETA, Carolina E. Materiales mesoporosos ordenados en la eliminación de contaminantes en efluentes textiles. Trabajo de doctorado en química. Bahía Blanca, Argentina. Universidad Nacional del Sur. 2010. 168 p.

ZULETA, Ana. Evaluación del proceso de degradación de un colorante sintético tipo azo mediante un sistema de fermentación en estado sólido. Trabajo de maestría en medio ambiente y desarrollo. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Departamento de geociencias y medio ambiente. 2013. 89 p.

ZUORRO, Antonio; LAVECCHIA, Roberto y NATALI, Stefano. Magnetically Modified Agro-Industrial Wastes as Efficient and Easily Recoverable Adsorbents for Water Treatment. *Chemical Engineering Transactions*. 2014, Vol. 38, pp. 349.354.

ANEXOS

ANEXO A

LISTADO DE LAS LONGITUDES DE ONDA CARACTERÍSTICAS PARA LOS GRUPOS FUNCIONALES MÁS COMUNES

Tabla 1. Listado de las longitudes de onda características para los grupos funcionales más comunes

Grupo funcional	Asignación	Longitud de onda (cm ⁻¹)
	Estiramiento O-H del alcohol	3.600
Alcoholes y fenoles	Estiramiento O-H del fenol	3.550-3.500
	Estiramiento C-O	1.300-1.000
Éteres	Estiramiento C-O-C	1.100
	Estiramiento C-H del aldehído	2.900-2.700
	Estiramiento C=O del aldehído alifático	1.740-1.720
Aldehídos y cetonas	Estiramiento C=O de la cetona alifática	1.730-1.700
	Estiramiento C=O del aldehído aromático	1.720-1.680
	Estiramiento C=O de la cetona aromática	1.700-1.680
	Estiramiento C=O alifático	1.750-1.730
Ésteres	Estiramiento C=O aromático	1.730-1.705
	Estiramiento C-O aromático	1.310-1.250
	Estiramiento C-O alifático	1.300-1.100
	Estiramiento O-H	3.300-2.500
	Estiramiento C=O	1.700
Ácidos carboxílicos	Flexión C-O-H en el plano	1.430
	Estiramiento C-O	1.240
	Flexión C-O-H fuera del plano	930
	Estiramiento C=O	1.840-1.800
Anhídridos	Estiramiento C=O	1.780-1.740
	Estiramiento C-O	1.300-1.100

Fuente: MONDRAGÓN, Pedro. Principios de la espectroscopia infrarroja. En: Espectroscopia de infrarrojo para todos. 1 ed. Jalisco, México: Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., 2017. p. 33.